ORSAY
Série A. N°
N° D'ordre :
139

THESE

présentée

A L'UNIVERSITE DE PARIS XI

Par

U WIN TIN

Pour l'obtention du titre

de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PARIS

Sujet de la thèse :

ETUDE DE L INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA PROPAGATION TRANSHORIZON DANS LA TROPOSPHERE

Soutenue le 15 décembre 1972 devant la commission d'examen

Jury :

Président	M. BERTEIN
Examinateur	M. SEPTIER
Examinateur	M. BOITHIAS
Examinateur	M. DU CASTEL

THESE

présentée

A L'UNIVERSITE DE PARIS XI

Par

U WIN TIN

Pour l'obtention du titre

de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PARIS

Sujet de la thèse :

ETUDE DE L INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA PROPAGATION TRANSHORIZON DANS LA TROPOSPHERE

Soutenue le 15 décembre 1972 devant la commission d'examen

Jury :

Président	M. BERTEIN
Examinateur	M. SEPTIER
Examinateur	M. BOITHIAS
Examinateur	M. DU CASTEL

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

SOMMAIRE

La plupart des études expérimentales sur la propagation transhorizon par les hétérogénéités de l'atmosphère ont été faites dans des conditions particulières et par suite, il est extrêmement difficile de comparer entre eux les résultats obtenus, pour en déduire l'influence d'un paramètre et principalement l'influence de la fréquence sur l'affaiblissement de transmission.

Le but de cette thèse est de faire une étude systématique de ce problème, et de voir dans quelle mesure les règles empiriques souvent utilisées sont conformes à la réalité.

Après avoir décrit les expériences faites par différents auteurs, et après avoir étudié les précautions nécessaires pour les mesures, on décrit les essais de propagation effectués aux fréquences 460 et 2220 MHz, entre LANNION - CONCHES (325 km) et LANNION - VILLEDIEU, (162 km), de mai à juillet 1971 et de janvier à mars 1972.

A partir de ces mesures, on étudie les résultats obtenus, au point de vue des variations de l'affaiblissement en fonction de la fréquence et en particulier, les effets importants de la longueur du trajet et de la saison.

On a mis en évidence que :

1°) l'affaiblissement croît plus vite en fonction de la fréquence sur un trajet long que sur un trajet court,

2°) l'affaiblissement croît plus vite en fonction de la fréquence l'été que l'hiver,

3°) pour les niveaux reçus faibles, la loi en fréquence a en moyenne un exposant plus petit que pour les niveaux reçus moyens ou forts.

Finalement, on compare les résultats à ceux déduits de la théorie concernant le phénomène de réflexion par les feuillets dans la troposphère.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 5

2. DIFFICULTES DES MESURES 6

2.1. Influence de la fréquence sur la valeur de l'affaiblissement 6

2.1.1. Simultanéité des mesures aux deux fréquences

2.1.2. Puissance d'émission

2.1.3. Gain des antennes

2.1.4. Choix de l'écart des fréquences

2.2. Influence de la longueur du trajet sur l'effet de la fréquence 8

3. ETUDE DES TRAVAUX ANTERIEURS 9

4. DESCRIPTION DES MESURES EFFECTUEES 11

4.1. Emplacement des stations 11

4.2. Description des équipements 11

4.2.1. Antennes et lignes de transmission

4.2.2. Emetteurs et récepteurs

4.3. Méthode d'enregistrement 12

4.4. Epoque des mesures 12

4.5. Dépouillement des bandes 13

5. RESULTATS OBTENUS 14

5.1. Présentation des résultats 14

5.2. Effet de la distance 14

5.3. Effet saisonnier 15

5.4. Effet de l'affaiblissement de propagation 16

6. INTERPRETATION DES RESULTATS 17

6.1. Considérations théoriques 17

6.1.1. Introduction des coefficients

6.1.2. Lois en fréquence

6.2. Interprétation 22

6.2.1. Effet de la distance sur la loi en fréquence

6.2.2. Effet saisonnier

6.2.3. Effet de l'affaiblissement de propagation sur la loi en fréquence

.../...

7. CONCLUSION 24

8. ANNEXES I - Coefficient de directivité d'une surface 26

II - Coefficient d'HUYGENS-FRESNEL 29

9. REFERENCES 36

10. TABLEAUX 38

1. Caractéristiques de liaisons 39
2. Affaiblissements des liaisons 40
3. Lois expérimentales de la fréquence par rapport à l'espace libre 41

11. FIGURES 42

1. Gain effectif d'une antenne 43
2. Carte des liaisons 44
3. Profil des liaisons 45
4. Profil du volume commun 162 km 460 MHz 46
5. Profil du volume commun 162 km 2220 MHz 47
6. Profil du volume commun 325 km 460 MHz 48
7. Profil du volume commun 325 km 2220 MHz 49
8. Schéma de principe Emetteur 460 MHz 50
9. Schéma de principe Emetteur 2220 MHz 51
10. Schéma de principe Récepteur 460 MHz 52
11. Schéma de principe Récepteur 2220 MHz 53

Distribution des affaiblissements/E.L.

12. L'effet de la distance mai à juillet 1971 54
13. L'effet de la distance Janvier à mars 1972 55
14. L'effet de la distance année 71 - 72 56
15. L'effet saisonnier 162 km 57
16. L'effet saisonnier 325 km 58

Distribution des "q"

17. L'effet de la distance mai à juillet 1971 59
18. L'effet de la distance janvier à mars 1972 60
19. L'effet saisonnier 162 km 61
20. L'effet saisonnier 325 km 62

.../...

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548022_0010

Graphique de la corrélation de q/affaiblissement

21. 162 km juin à juillet 1971 63
22. 162 km janvier à février 1972 64
23. 325 km mai à juillet 1971 65
24. 325 km mars 1972 66

Courbes théoriques

25. Coefficient de directivité d'une surface 67
26. Coefficient d'HUYGENS-FRESNEL 68

Résultats expérimentaux 1950 - 1972

27. Résultats expérimentaux de l'influence de la fréquence sur la propagation troposphérique 69

---

1. INTRODUCTION

L'existence d'émetteurs puissants (radars, émetteurs à modulation de fréquence, émetteurs de télévision, etc...) à des fréquences bien supérieures à la fréquence de coupure de l'ionosphère a permis de s'apercevoir qu'à grande distance, la valeur du champ reçu était très supérieure à celle que laissait prévoir la théorie de la diffraction sphérique. Le champ reçu est dû à la réflexion ou à la diffusion par les hétérogénéités de l'atmosphère de l'énergie en provenance de l'émetteur.

Ce type de propagation permet de réaliser des faisceaux hertziens dits "transhorizon", transmettant jusqu'à 120 voies téléphoniques avec des distances entre stations de plusieurs centaines de kilomètres, en utilisant des puissances élevées (1 à 10 KW) et des grandes antennes paraboliques (10 à 30 mètres de diamètre).

De nombreuses études expérimentales ont été faites sur la propagation transhorizon. Cependant la plupart de ces études étaient faites à une fréquence unique, avec des conditions particulières de gain d'antenne, de trajet, etc... Par suite il est extrêmement difficile de comparer entre eux, les résultats obtenus, pour en déduire l'influence d'un paramètre déterminé à l'exclusion des autres.

En particulier, peu d'études systématiques ont été faites pour déterminer directement l'influence de la fréquence sur l'affaiblissement de transmission. En outre, on n'a jamais étudié de façon complète, comment la loi de variation de l'affaiblissement en fonction de la fréquence pouvait dépendre de la longueur de la liaison ou des variations saisonnières de l'affaiblissement.

Le but de ce travail est de faire une étude systématique de ce problème, et de voir dans quelle mesure les règles empiriques souvent utilisées sont conformes à la réalité.

---

2. DIFFICULTES DES MESURES

Quand on veut mesurer l'influence de la variation d'un paramètre, il est nécessaire que les autres ne changent pas, ou tout au moins, qu'on puisse calculer d'une façon sûre, l'influence de leur variation.

2.1. Influence de la fréquence sur la valeur de l'affaiblissement sur un trajet donné.

Examinons d'abord quelles sont les précautions à prendre pour mesurer l'influence de la fréquence sur l'affaiblissement sur un trajet donné.

Le principe de mesure est très simple : on établit, sur ce trajet, deux liaisons à des fréquences différentes, on mesure les niveaux reçus et on trace leur loi de distribution. La comparaison des niveaux reçus à chaque instant et celle de leur loi de distribution permettent de connaître l'influence de la fréquence sur la liaison considérée, si les mesures ont été faites simultanément sur les deux liaisons, et si la puissance d'émission et le gain des antennes sont identiques.

Comme il n'est pas facile de disposer d'équipements exactement identiques à deux fréquences différentes, étudions d'abord, l'importance de la simultanéité des mesures, de la différence de puissance d'émission, et de la différence de gain d'antenne.

2.1.1. Simultanéité des mesures, aux deux fréquences.

Dans le courant d'une journée, le niveau reçu pouvant varier de plusieurs dizaines de dB, on ne pourra donc tirer de conclusion valable de statistiques portant sur des périodes de mesures différentes, sauf si les périodes de mesures sont très longues (plusieurs années). Si la mesure ne porte que sur quelques mois, la simultanéité des mesures est indispensable.

2.1.2. Puissance d'émission.

Comme le milieu de transmission est linéaire, la puissance d'émission peut sans inconvénient être différente sur les deux fréquences. Il suffit d'effectuer des corrections au dépouillement.

2.1.3. Gain des antennes.

Sur une liaison transhorizon, le champ provient de la réflexion ou de la diffusion de l'énergie rayonnée sur les inhomogénéités de l'atmosphère, contenues dans le volume commun. Si les volumes communs de deux liaisons parallèles, réalisées

.../...

à la même fréquence sont différents, les inhomogénéités de l'atmosphère participant à la transmission sont également différentes et les caractéristiques du champ reçu sur les deux liaisons seront également différentes. Si nous voulons étudier l'influence de la fréquence, il faudra donc que les volumes communs des deux liaisons soient identiques, sous peine d'attribuer à l'influence de la fréquence des variations dûes à la différence de grandeur du volume commun.

Comme il n'est pas facile d'avoir des gains d'antenne absolument identiques sur deux liaisons, il nous faut essayer de préciser dans quelle mesure le phénomène de baisse de gain d'antenne peut perturber la mesure.

Considérons en effet, une liaison transhorizon. A la réception, plaçons deux antennes côte à côte, l'une de gain très élevé (par exemple 40 dB), l'autre de gain plus faible (par exemple 30 dB). Sur les courbes d'enregistrement, du niveau reçu, déterminons la valeur des médianes horaires et comparons les. Nous constatons que la différence des niveaux reçus est variable et atteint rarement 10 dB. A un instant donné, le gain de l'antenne de 40 dB semble avoir diminué. On dit qu'il y a baisse de gain d'antenne.

Supposons maintenant que le gain des antennes de réception soit 15 et 25 dB. La différence entre les niveaux reçus sera toujours égale à 10 dB. Il n'y a pas de baisse de gain d'antenne pour les antennes de gain faible.

La figure 1 tirée de [1] représente le gain effectif moyen d'une antenne de diamètre donné sur une liaison transhorizon.

Nous en tirons les conséquences suivantes, pour étudier l'effet de la fréquence sur la valeur de l'affaiblissement.

- Si nous utilisons des gains d'antenne élevés, il est nécessaire que les gains soient aussi voisins que possible.

- Si nous utilisons des gains faibles, (inférieur à 30 dB), la différence entre les gains des antennes n'a pas d'importance.

De toute façon, les mesures nécessiteront un équipement largement dimensionné. En effet :

- Si nous utilisons une puissance d'émission faible, il faudra des antennes à gain élevé ; donc des paraboles de très grand diamètre à la fréquence basse.

.../...

---

[1] L. BOITHIAS et J. BATTESTI
Les faisceaux hertziens transhorizon de haute qualité.
(Annales des Télécommunications, Tome 20, N°s 7-8) juillet-août 1965

- Si nous voulons utiliser des antennes à faible gain, il faudra des puissances d'émission élevées, particulièrement à la fréquence haute où l'affaiblissement est le plus élevé.

- Si la marge de mesure est insuffisante, le niveau reçu sera inférieur au bruit du récepteur pendant un certain pourcentage de temps, ce qui risque de fausser les résultats.

2.1.4. Choix de l'écart de fréquence.

Pour que les mesures soient significatives, il est souhaitable que l'écart des fréquences soit grand, mais la valeur de cet écart est limitée par les considérations précédentes. Grâce à l'équipement de mesure du C.N.E.T., nous avons pu comparer les fréquences 460 et 2220 MHz, en ayant toujours une marge suffisante au dessus du bruit.

2.2. Influence de la longueur du trajet sur l'effet de la fréquence.

Pour déterminer cette influence il est nécessaire d'avoir deux trajets de longueurs différentes. Si les mesures ont une durée relativement courte, (quelques mois), l'influence de la longueur du trajet ne peut être mise en évidence que si les mesures sont faites simultanément sur les deux trajets. Il est souhaitable également que les deux trajets soient aussi proches que possible, pour que les conditions climatiques soient les mêmes. Le meilleur procédé consiste à utiliser un émetteur commun et deux stations de réception alignées. Le gain des antennes doit être identique dans les stations de réception, sauf si les antennes ont un gain suffisamment faible, pour qu'il n'y ait pas baisse de gain d'antenne.

---

3. ETUDE DES TRAVAUX ANTERIEURS

Dans les années qui ont suivies la deuxième guerre mondiale, des mesures sur ondes métriques, puis décimétriques et centimétriques ont été effectuées aux Etats Unis. La comparaison des résultats de ces mesures, dont les caractéristiques (longueur, fréquence, gain des aériens, durée, climat), étaient toutes différentes, ne pouvaient évidemment pas permettre de déterminer avec précision, une loi de variation de l'affaiblissement en fonction de la fréquence, mais elle fit apparaître rapidement que l'affaiblissement croissait en fonction de la fréquence, puis, plus précisément que cet affaiblissement était à peu près proportionnel à f^3. [2].

La première expérience consistant à mesurer l'affaiblissement de plusieurs fréquences sur un même trajet a été effectuée en 1950 dans l'état d'Arizona [3] . Les longueurs d'onde utilisées étaient 3,2 cm, 9,3 cm et 24 cm. La longueur du trajet n'était malheureusement que de 75 km, et le profil tel que le champ de diffraction n'était nullement négligeable devant celui de diffusion. Les diamètres des antennes d'émission et de réception étaient de 1,2 m, quelle que soit la fréquence. Leur gain aux différentes fréquences était respectivement de 40, 31 et 22 dB. Pour la fréquence la plus haute, il y a donc baisse de gain d'antenne. Les résultats trouvés ont été que l'affaiblissement varie comme f^5 entre 24 et 9,3 cm et comme f^4 entre 9,3 et 3,2 cm.

En 1953-54, un autre essai a été effectué à New Foundland [4] , aux fréquences 505 et 4090 MHz, sur un même trajet maritime de 275 km. Malheureusement, on a utilisé les mêmes antennes (d = 8,4 m) pour les deux fréquences, les gains des antennes étaient donc de 50 et 32 dB. Les essais ont duré un an. On peut déduire des résultats une loi en f^4 durant 50 % du temps.

.../...

---

[2] K. BULLINGTON
Characteristics of Beyond the Horizon Radio Transmission
(Proceedings, of the I.R.E. Vol. 43, No 10, pp. 1175 - 1179) Oct. 55

[3] L.G. TROLESE
Characteristics of Tropospheric Scattered Fields
(Proceedings of the I.R.E. Vol. 43, No 10, pp. 1300 - 1304) oct. 55

[4] K. BULLINGTON
Results of Propagation Tests at 505 Mc/s and 4090 Mc/s Beyoud the Horizon path.
(Proceedings of the I.R.E. Vol. 43, No 10, pp. 1306 - 1311) september 59.

En 1956, aux Etats Unis, A.B. Crawford [5] a fait une série d'expériences dont l'un des buts était la mesure de l'influence de la fréquence sur l'affaiblissement. Les caractéristiques de la liaison étaient les suivantes :

Longueur - 275 km
Fréquences - 450 MHz et 4110 MHz
Gain des antennes - 30,5 et 37 dB (à 460 MHz)
- 38,5 et 37 dB (à 4110 MHz)

On voit que la différence de gain aux deux fréquences est beaucoup moindre que dans les liaisons précédentes. Quoique les enregistrements n'aient pas été faits d'une manière continue, les mesures ayant duré d'avril 56 à décembre 57, un grand nombre d'heures ont été enregistrées. Les résultats sont les suivants : si l'on considère les lois de distribution des niveaux reçus aux deux fréquences, la différence d'affaiblissement est proportionnelle à $f^{3,25}$ durant 3 % du temps, $f^{2,88}$ durant 50 % du temps, $f^{2,67}$ durant 95 % du temps. Toutes les heures de mesure ont été comptées globalement et l'effet saisonnier n'a pas été étudié.

Des mesures ont été effectuées en Suède [6] en 1966 et 1967 sur un trajet de 259 km. Les fréquences comparées étaient 1 et 3 GHz. Les périodes de mesure étaient 15 jours en août, 15 jours en septembre, 8 jours en décembre et 4 nuits en avril. Leur durée est donc assez réduite. Ces mesures ont donné une loi en $f^{3,7}$ à 1 % du temps, $f^{3,6}$ à 50 % du temps et $f^{1,6}$ à 99 % du temps.

---

[5] A.B. Crawford, D.C. Hogg and W.H. Kummer
Studies in Tropospheric Propagation Beyond the Horizon
(The Bell System Technical Journal, pp. 1067 - 1093) sept. 59

[6] Folke Eklund and Sture Wickerts
Wave length Dependence of Microwave Propagation for beyond the Radio Horizon
(Radio Science, Vol. 3, pp. 1066 - 1074) 1968

4. DESCRIPTION DES MESURES EFFECTUEES

4.1. Emplacement des stations

Les stations d'essais se situent à LANNION en Bretagne, à VILLEDIEU et à CONCHES en Normandie. Les trois stations sont géographiquement sur une ligne droite (fig. 2). L'émission est à LANNION, la réception est à VILLEDIEU et à CONCHES. La distance LANNION - VILLEDIEU est de 162 Km et LANNION - CONCHES 325 km. Les liaisons entre LANNION - VILLEDIEU et LANNION - CONCHES sont faites simultanément aux fréquences 460 MHz et 2220 MHz. Le profil des liaisons est présenté sur la figure 3.

4.2. Description des équipements

4.2.1. Antennes et lignes de transmission

Toutes les antennes sont paraboliques sauf celle de VILLEDIEU, qui est un cornet. Le gain des antennes est indiqué dans le tableau 1, donnant les caractéristiques des liaisons.

Sur la liaison LANNION - VILLEDIEU, les gains d'antenne sont faibles et donc la baisse de gain d'antenne ne se manifeste pas.

Sur la liaison LANNION - CONCHES, il y a une légère baisse de gain pour chaque fréquence mais les baisses de gain sont équivalentes.

Les profils de volume commun de liaisons sont présentés sur les figures 4 à 7.

Pour relier l'émetteur à l'antenne, un câble coaxial rigide et un guide d'onde rectangulaire sont installés à LANNION, pour les fréquences 460 et 2220 MHz respectivement. La liaison entre le récepteur et l'antenne de VILLEDIEU est constituée par deux câbles coaxiaux souples pour les deux fréquences, tandis qu'à CONCHES, on utilise un câble coaxial souple à 460 MHz et un guide d'onde rectangulaire à 2220 MHz. Les pertes dans ces lignes sont mesurées et données dans le tableau 1.

4.2.2. Emetteurs et récepteurs

L'émetteur 460 MHz est à lampe, piloté par quartz et son étage de sortie utilise un tube QQE0640, produisant une puissance continue de 40 watts, efficace.

L'émetteur 2220 MHz est transistorisé aux étages de préamplification et de multiplication de fréquence. L'étage de sortie utilise un Klystron "VARIAN" du type VA800, produisant une puissance continue de 9000 watts efficaces.

On utilise les mêmes récepteurs à VILLEDIEU qu'à CONCHES.

Le récepteur à 460 MHZ est à lampe pilotée par quartz et il a un préamplificateur à faible bruit, utilisant le transistor AF 239. Le facteur de bruit de ce récepteur est de l'ordre de 5 dB et sa sensibilité est de l'ordre de(-130) dBm.

Le récepteur à 2220 MHz a un préamplificateur à diode tunnel de facteur de bruit 5 dB, et il possède un système de balayage de 0,5 MHz. Ce balayage permet le contrôle visuel avec un oscilloscope. Sa sensibilité est de l'ordre de (- 125) dBm.

Les figures 8 à 11 montrent le schéma de principe correspondant des émetteurs et des récepteurs.

4.3. Méthode d'enregistrement

Les puissances reçues sur les deux fréquences sont détectées avec une constante de temps d'environ 1 minute, et elles sont envoyées sur les deux pistes d'un enregistreur à travers deux amplificateurs courant continu.

Les étalonnages des récepteurs sont faits à l'aide de générateurs "Hewlett Packard".Les étalonnages sont faits généralement deux fois par jour, l'un dans la matinée et l'autre dans l'après-midi.

4.4. Epoque des mesures

Sur la liaison LANNION - CONCHES, les mesures effectuées à deux fréquences simultanément ont duré du 11 mai au 23 juillet 1971 en été, et du 15 mars au 31 mars 1972 en hiver. La durée pendant laquelle les deux stations de LANNION et de CONCHES fonctionnaient aux deux fréquences simultanément a été de 500 heures en été et de 301 heures en hiver.

Sur la liaison LANNION - VILLEDIEU, les mesures simultanées aux deux fréquences ont été effectuées du 7 juin au 23 juillet 1971 en été et du 5 janvier au 4 février 1972 en hiver. Il y a 360 heures en été et 407 heures en hiver où les stations de LANNION et de VILLEDIEU fonctionnent simultanément aux deux fréquences.

Puisque nous voulons étudier l'influence de la fréquence sans intervention des autres facteurs, nous n'avons pas pris en compte les heures d'enregistrement pendant lesquelles l'une de deux stations ou bien l'une de deux fréquences n'avait pas fonctionné .

.../...

4.5. Dépouillement des bandes

Sur les bandes enregistrées, les heures d'enregistrement simultané aux deux fréquences sont sélectionnées. Aux heures sélectionnées, les niveaux médians horaires sont lus à l'aide des courbes d'étalonnage faites au début de chaque période d'enregistrement. Par exemple, les niveaux médians en dBm entre 9 h 00 et 17 h 00 sont obtenus à l'aide des courbes d'étalonnage faites à 9 h 00 et ceux entre 17 h 00 et 9 h 00 du lendemain sont obtenus à l'aide des courbes d'étalonnage faites à 17 h 00 , la veille.Les périodes correspondant à un niveau reçu à 0,5 dB près sont cumulés dans les tableaux correspondants ; deux pour CONCHES et deux pour VILLEDIEU, chaque tableau indiquant la fréquence, la date, l'heure d'enregistrement et le niveau reçu médian correspondant.

---

5. RESULTATS OBTENUS

5.1. Présentation des résultats

1°. Nous avons tracé pour chaque liaison, et pour chaque période, aux deux fréquences, la loi de distribution des affaiblissements par rapport à l'espace libre, (fig. 12, 13, 14, 15, 16).

Pour les pourcentages du temps, 1 %, 50 %, et 99 %, nous avons indiqué la valeur de "q",

$$q = (A_2 - A_1) / (10 \text{ Log } f_2 / f_1)$$

A_1 et A_2 étant les affaiblissements en dB par rapport à l'espace libre aux deux fréquences. Si q = 1, on a une loi en f^3 pour la variation de l'affaiblissement par rapport à la fréquence, puisque l'affaiblissement en espace libre suit une loi en f^2.

A partir des figures précédentes, nous avons dressé le tableau 3, donnant les valeurs de "q", aux pourcentages de temps indiqués précédemment, pour les différentes périodes de mesure.

2°. En comparant heure par heure, les niveaux reçus en deux fréquences, nous avons tracé la loi de distribution de "q", pour les deux liaisons, aux différentes époques de mesure.

(fig. 17, 18, 19, 20).

3°. En vue de déterminer une corrélation possible entre la valeur de "q" et le niveau reçu, nous avons tracé les graphiques des figures 21 à 24.

5.2. Effet de la distance

On voit sur les figures 12 et 13, que les lois de distribution des affaiblissements à 460 et 2220 MHz sont beaucoup plus rapprochées sur LANNION - VILLEDIEU (162 Km), que sur LANNION - CONCHES (325 km).

Ce phénomène est plus marqué en hiver qu'en été, où pour 99 % du temps, les valeurs de "q" sont identiques.

Si on cumule toutes les heures de mesure, on voit (fig. 14 et tableau 3), que sur LANNION - CONCHES (325 km), la loi en fréquence varie sensiblement de f^4 pour 1 % du temps à f^3 pour 99 % du temps, et que sur LANNION - VILLEDIEU (162 km), la loi varie de $f^{3,5}$ à 1 % du temps à $f^{2,44}$ à 99 % du temps.

.../...

L'effet de la distance est confirmé par la loi de distribution des "q", obtenue en comparant les niveaux reçus heure par heure, aux deux fréquences et sur les deux liaisons.

On voit figures 17 et 18 que la valeur moyenne de "q" est supérieure sur la liaison longue. Pour 50 % du temps, on a :

Liaison	"q" Eté	"q" Hiver
LANNION - CONCHES (325 km)	1,8	1,75
LANNION - VILLEDIEU (162 km)	1,1	0,6

On remarquera que la plage de variation de "q" est plus grande sur la liaison courte que sur la liaison longue, où on n'a jamais observé de valeur négative de "q". Les plages de variation sont les suivantes :

Liaison	"q" Eté	"q" Hiver
LANNION - CONCHES (325 km)	+ 0,8 à + 3,6	+ 0,4 à + 2,6
LANNION - VILLEDIEU (162 km)	- 1 à + 4	- 0,8 à + 2,2

En conclusion, on peut dire que l'affaiblissement croit plus vite en fonction de la fréquence sur une liaison de 325 km que sur une liaison de 162 km.

5.3. Effet saisonnier

L'effet saisonnier est nettement marqué sur la liaison courte.

On voit figure 15 que les lois de distribution des affaiblissements sont plus écartées en été qu'en hiver et que la valeur de "q", pour n'importe quel pourcentage de temps est plus élevée en été qu'en hiver.

Ceci est confirmé par les lois de distribution des "q", représentées sur la figure 19.

Cet effet est moins marqué sur la liaison longue (fig. 16) où en été "q" est supérieur pour 1 % et 50 %. Par contre, pour 99 % la valeur de "q" est plus élevée en hiver qu'en été.

.../...

Si l'on se reporte à la loi de distribution de "q", (fig. 20), on voit que les valeurs de "q", sont légèrement plus élevées en été qu'en hiver.

On doit remarquer que les mesures sur la liaison longue ont été effectuées de mai à juillet 1971, puis en mars 1972. L'effet saisonnier est donc moins marqué que sur la liaison courte où les mesures ont été faites en juin, juillet 1971 et janvier, février 1972 (mois les plus défavorables).

Sur la figure 20, nous avons tracé également la loi de distribution de "q" pour le seul mois de juillet, on voit qu'elle est située nettement plus haut que celle du mois de mars.

En conclusion, on peut dire que l'affaiblissement croit plus vite en fonction de la fréquence l'été que l'hiver. Cet effet semble plus marqué aux faibles distances.

5.4. Effet de l'affaiblissement de propagation

Pour voir la corrélation entre la valeur de "q" et l'affaiblissement de propagation, nous avons tracé les graphiques des figures 21 à 24.

Considérons la figure 21 (162 km, été). On voit que la valeur moyenne de "q" est plus petite aux faibles niveaux et que la dispersion y est moindre qu'aux niveaux moyens et forts. Les plus fortes valeurs de "q" et la dispersion la plus grande est obtenue aux niveaux moyens.

Sur la figure 22 (162 km, hiver), la valeur moyenne la plus faible de "q" est obtenue également pour les faibles niveaux, mais la dispersion des points est élevée. La valeur moyenne de "q" croit avec le niveau reçu.

Sur la figure 23 (325 km, été), on voit que la valeur moyenne de "q" croit avec le niveau reçu, la dispersion est la plus grande aux niveaux moyens.

Sur la figure 24 (325 km, hiver) une loi analogue semble se dessiner.

En conclusion, on peut dire que pour les valeurs faibles du niveau reçu de propagation, la valeur de "q" est en moyenne plus faible que pour les niveaux reçus moyens ou forts.

---

6. INTERPRETATION DES RESULTATS

6.1. Considérations théoriques

Depuis 1950, plusieurs auteurs ont établi les théories sur la propagation transhorizon dans la troposphère. Certains ont appelé cette propagation "Diffusion par Turbulence" [7], et d'autres l'ont décrit comme "Réflexion par couches atmosphériques" [8]. Puis les théories de "Diffusion Turbulentielle" et de "Réflexions partielles" [9] et "Dispersion par feuilletage de l'atmosphère" [10] ont été appliquées au phénomène de la propagation troposphérique.

Pour interpréter nos résultats, nous allons appliquer la théorie de "réflexions partielles" [9] avec des coefficients que nous introduisons plus tard.

.../...

---

[7] H. G. BOOKER and W.E. GORDON
A theory of Radio Scattering in the Troposphere.
(Proceedings of the I.R.E., No 38, p 401) april 1950

[8] H. T. FRISS and A. B. CRAWFORD
A reflection theory for Propagation beyond the horizon.
(The Bell System Technical Journal, No 36, p. 627) may 1957

[9] F. DU CASTEL
Propagation troposphérique et faisceaux hertziens transhorizon.
(Edition CHIRON, PARIS, chapitre cinquième, p. 185) 1961

[10] P. BECKERMANN and A. SPIZZICHINO
The scattering of electromagnetic waves from Rough surfaces.
(Pergamon Press, Electromagnetic waves vol. 4, chapter 19, p. 418) 1963

Selon le mode de réflexion, la loi de la variation de puissance réfléchie, par rapport à l'espace libre est donnée par [9 - a] .

$P_s \sim \lambda^3 \ (1 - \gamma^2)$ réflexion spéculaire

et $P_d \sim \lambda^2 \ (1 - \gamma^2)$ réflexion diffuse

($\sim$ désigne la proportionnalité).

P_s = la puissance réfléchie par l'intermédiaire du feuilletage de la troposphère en considérant les puissances élémentaires dont les termes sont en phase (dénommée spéculaire).

P_d = la puissance réfléchie par l'intermédiaire du feuilletage de la troposphère en considérant les puissances élémentaires dont les phases sont aléatoires (dénommée Diffuse).

$\gamma = \frac{\text{Sin } u}{u}$, une valeur approchée de l'intégrale de γ (t), sur la surface S du feuillet ; γ (t) est une fonction caractérisant la disposition des irrégularités.

avec $u = (4 \pi \Delta h / \Lambda)$

Δ = l'angle d'incidence moyen d'un rayonnement sur la surface S.

h = la hauteur maximale des irrégularités.

Λ = la longueur d'onde d'espace = $2 \lambda / \theta$

λ = la longueur d'onde

et θ = l'angle du rayonnement réfléchi par rapport à celui d'incidence [fig. (a), paragraphe 6.2.1.]

Si l'on respecte le critère de RAYLEIGH d'une surface irrégulière, $h < \frac{\Lambda}{8}$, on a $(1 - \gamma^2) \simeq u^2/6 \simeq \left[2 \ (\theta \pi \Delta h)^2 / 3 \lambda^2 \right]$, avec une erreur maximum de 8,6 % à $u = \pi/2$.

Nous pouvons donc écrire :

$P_s \sim \lambda^3 \left[2 \ (\theta \pi \Delta h)^2 / 3 \lambda^2 \right] \sim \lambda$ réflexion spéculaire

$P_d \sim \lambda^2 \left[2 \ (\theta \pi \Delta h)^2 / 3 \lambda^2 \right] \sim k$ réflexion diffuse

.../...

[9-a] F. DU CASTEL
(Propagation troposphérique et faisceaux hertziens Transhorizon, chapitre cinquième, p. 215 - 216).

k est une valeur indépendant de λ.

6.1.1. Introduction des coefficients

1°) dans le cas de la réflexion spéculaire, nous supposons que le faisceau des rayons réfléchis possède un lobe de rayonnement comme pour les antennes, et qu'une partie de la puissance qui atteint le récepteur est dûe aux rayons secondaires réfléchis par les feuillets qui ne se situent pas au milieu de la liaison, mais qui sont contenus dans le volume commun des deux faisceaux provenant des antennes.

Si P_Θ et P_p sont des puissances rayonnées dans la direction Θ et dans la direction principale, nous avons (annexe I).

$$\frac{P_\Theta}{P_p} = (1 - 1/\rho_{d^2})$$

avec ρ_d = le coefficient de directivité défini à l'annexe I.

$$\rho_d^2 = [3\lambda^2/S'][4\pi(1 \sim d_o/d)]^{-2}$$

$(1 \sim do/_d)$ est une valeur égale soit à $(1 - do/_d)$ soit à $(do/_d - 1)$ avec $S' \simeq (1'_1)^2$

$1'_1$ étant la longueur fictive du feuillet, définie dans la figure (b), paragraphe 6.2.1 .

d_o = la distance parcourue par le rayonnement direct

d = la distance parcourue par le rayonnement secondaire

(d_o et d sont définis dans la figure I-d, annexe I).

2°) Dans le cas de la réflexion diffuse, on applique le principe d'HUYGENS-FRESNEL [11], au phénomène de la réflexion par le feuillet, (annexe II).

.../...

---

[11] G. BRUHAT
Diffraction par des ouvertures à bords rectilignes
(Optique, chapitre X, 4ème édition, p. 179) 1954

Le faisceau réfléchi, provenant d'un feuillet quelconque situé dans le volume commun des deux faisceaux des antennes, atteint le point R' qui n'est pas obligatoirement le récepteur R (fig. (II-a), annexe II).

Si nous posons :

$|E_{r'}|$ = la valeur absolue du champ effectif en R'

ε_o = le champ de crête à l'émission (valeur effective $\varepsilon_{o/\sqrt{2}}$)

et après avoir fait l'intégration sur la surface S, en considérant la différence des deux trajets, l'un du rayon réfléchi au milieu (centre des coordonnées) du feuillet et l'autre du rayon réfléchi en un point quelconque sur ce feuillet, et si nous posons le coefficient d'HUYGENS-FRESNEL en espace libre $\rho_{hf} = \frac{|E_{r'}|}{\varepsilon_o}$, nous aurons :

$$\rho^2_{hf} = \frac{4\lambda^2}{d_o^2} f(u) f(v)$$

Si ρ_{uv} = le coefficient d'HUYGENS-FRESNEL par rapport à l'espace libre, nous aurons :

$$\rho_{uv} = 4 f(u) f(v)$$

avec $u = \alpha l_1$, $v = \alpha l_2$

$\alpha = 2 / [\lambda a]^{1/2}$

$a \simeq do/_2$

l_1 et l_2 étant la longueur et la largeur du feuillet, et d_o étant défini comme avant.

Nous écrivons les fonctions,

$$f(u) = [\zeta^2(u) + \eta^2(u)]$$

$$f(v) = [\zeta^2(v) + \eta^2(v)]$$

ζ et η sont les intégrales de FRESNEL définis par :

$$\zeta(u) = \int_o^u \text{Cos} \frac{\pi u^2}{2} du$$

$$\eta(u) = \int_o^u \text{Sin} \frac{\pi u^2}{2} du$$

.../...

Nous avons tracé dans la figure 26, le coefficient ρ_{uv} en fonction de uv, uv étant égale à $[8\ S/\lambda\ d_0]$. La surface S est prise comme le produit $l_1 \times l_2$. Le coefficient ρ_{uv} est tel que, lorsque uv est petit, $(uv \leq 0{,}5)$,

$$\zeta(u) = \zeta(v) \simeq u \simeq v$$

et $$\eta(u) = \eta(v) = 0$$

Donc $$\rho_{uv}^2 \simeq 4\,u^2v^2 = 4\,[8S/\lambda d_0]^2\,\lambda^{-2}$$

Par contre, dans le cas où uv est grand,

$$\zeta(u) = \zeta(v) = 0{,}5$$

et $$\eta(u) = \eta(v) = 0{,}5$$

et $$\rho_{uv}^2 = 1$$

6.1.2. Lois en fréquence

Nous considérons deux cas extrêmes, qui peuvent intervenir dans le phénomène de "réflexion par le feuilletage de la troposphère".

1°) nous avons vu que dans le cas de la réflexion spéculaire, la puissance réfléchie par rapport à l'espace libre $P_S \sim \lambda$.

Dans ce cas, si le faisceau des rayons possède un lobe de rayonnement dont le coefficient de directivité est

$$\rho_d^2 = [3\lambda^2/S'][4\pi\,(1 \sim d_0/d)^{-2}],$$

la puissance réfléchie par rapport à l'espace libre, P_s qui atteint le récepteur s'écrira :

$$P'_s = P_s\ \rho_d^2 = K_s\ \lambda^3$$

K_s est une constante de proportionnalité en réflexion spéculaire. La réflexion spéculaire, provenant de feuillets de grandes dimensions, aura un coefficient d'HUYGENS-FRESNEL, ρ_{uv} constant et égal à 0,5.

.../...

En conclusion, l'affaiblissement de propagation par rapport à l'espace libre variera en fonction de la fréquence comme f^3, ou l'affaiblissement total de la propagation variera comme f^5, en réflexion spéculaire par des feuillets de grandes dimensions.

2°) Nous avons vu que dans le cas de la réflexion diffuse, la puissance réfléchie par rapport à l'espace libre $P_d \sim K$ (indépendant de λ).

Si cette réflexion est produite par l'intermédiaire de feuillets de petites dimensions, nous devons obligatoirement considérer le coefficient d'HUYGENS-FRESNEL ρ_{uv}, qui est une fonction de la longueur d'onde.

$$\rho_{uv}^2 \simeq 4 \left[8S/d_o \right]^2 \lambda^{-2}$$

La puissance réfléchie par rapport à l'espace libre P'_d qui atteint le récepteur, dûe à la réflexion diffuse par de petits feuillets, s'écrira :

$$P'_d = P_d \rho_{uv}^2 \simeq K_d \lambda^{-2}$$

K_d est une constante de proportionnalité en réflexion diffuse. La réflexion diffuse, résultant de feuillets de petites dimensions, n'aura évidemment pas de coefficient de directivité, le lobe étant à peu près omnidirectionnel.

En conclusion, l'affaiblissement de propagation par rapport à l'espace libre variera en fonction de la fréquence comme f^{-2} ou l'affaiblissement total de propagation variera comme f°, en réflexion diffuse par des feuillets de petites dimensions.

6.2. Interprétation

6.2.1. Effet de la distance sur la loi en fréquence

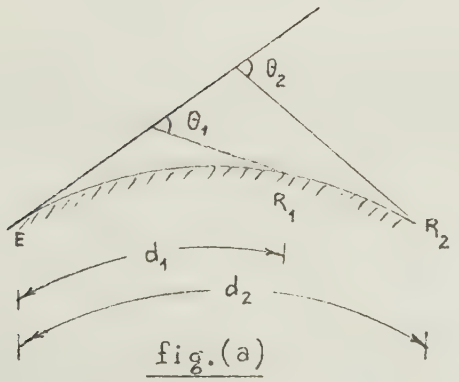


fig.(a)

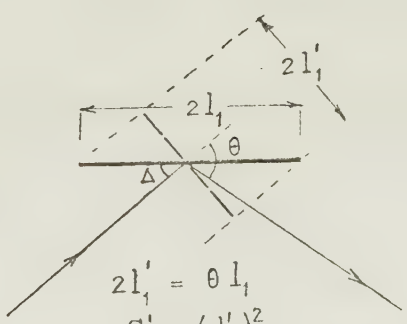


fig.(b)

.../...

En admettant une proportionnalité de θ à la distance de la liaison, fig. (a), la surface apparente S' des feuillets est grande fig. (b), dans le cas d'une liaison longue. Il en résulte une plus grande probabilité de réflexion spéculaire. En comparant avec la considération théorique, la loi de variation de la puissance réfléchie en fonction de la fréquence sera forte la liaison est longue. Par contre, quand la liaison est courte, la surface apparente diminue et la réflexion diffuse tend à être prépondérante, donnant une loi en fréquence plus faible.

6.2.2. Effet saisonnier

Quand la saison est plus favorable, les affaiblissements sont faibles, ce qui correspond à l'existence des grands feuillets, et, dans ce cas, la réflexion spéculaire va dominer [10 - a] . Par conséquent, la loi en fréquence deviendra plus forte.

6.2.3. Effet de l'affaiblissement de propagation sur la loi en fréquence

L'effet de l'affaiblissement de propagation sur la loi en fréquence est analogue à l'interprétation donnée au paragraphe 6.2.2.

Si nous regardons les résultats présentés dans les figures 21 à 24, nous voyons que les lois avec $q < o$ sont obtenues uniquement sur la liaison courte, et l'on peut donc penser que la réflexion diffuse à exister seulement pendant quelques heures d'enregistrement.

[10 - a] P. BECKERMANN and A. SPIZZICHINO
The scattering of Electromagnetic waves fun rough surfaces
(chapter 19, p. 430)

7. CONCLUSION

Notre étude a permis de préciser l'effet de la fréquence sur l'affaiblissement en propagation transhorizon.

Les principaux résultats sont les suivants :

1°. L'effet de la fréquence sur l'affaiblissement est plus marqué sur les liaisons longues que sur les courtes.

2°. L'effet de la fréquence sur l'affaiblissement est plus important l'été que l'hiver.

3°. L'effet de la fréquence sur une liaison donnée est en général plus important pour les niveaux forts que pour les niveaux faibles.

4°. Pour la liaison de 325 km de long, la loi en fréquence est à peu près égale à f^3 pour les niveaux dépassés durant 99 % du temps et à $f^{3,5}$ pour les 50 % du temps. Pour la liaison de 162 km, la loi en fréquence est à peu près égale à $f^{2,5}$ pour les niveaux dépassés durant 99 % du temps et $f^{2,7}$ pour les 50 % du temps.

Les considérations théoriques basées sur la réflexion par des feuillets conduisent pour l'influence de la fréquence à une loi qui varie de f° à f^5. On voit que les résultats expérimentaux que nous avons obtenus sont à très peu près compatibles avec cette théorie.

Il nous semble que l'intérêt de notre étude est double.

D'une part, le phénomène de propagation étant dû à des mécanismes différents, ayant chacun une loi en fréquence différente, la continuation de l'étude que nous avons effectuée permet d'espérer qu'on arrivera ainsi à déterminer la répartition des différents mécanismes.

D'autre part, il attire l'attention des constructeurs de faisceaux hertziens sur le fait que la loi en fréquence diffère suivant la longueur du trajet et de la saison. Un grand nombre de faisceaux hertziens transhorizons ayant des longueurs comprises entre 160 et 325 km, les résultats de notre étude peuvent être appliqués directement.

---

8. ANNEXES.

A N N E X E . I

Coefficient de directivité d'une surface

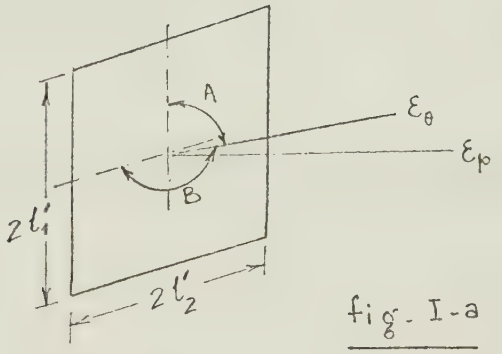


fig. I-a

$\mathcal{E}_p$ = Champ du rayon principal

$\mathcal{E}_\theta$ = Champ du rayon dans la direction

A = Angle du directeur θ par rapport à l'axe paralèlle à $2l'_1$ (fig I-a)

B = Angle du directeur θ par rapport à l'axe paralèlle à $2l'_2$ (fig I-a)

l'_1 = Longueur de la surface = longueur fictive du feuillet

l'_2 = Largeur de la surface = largeur fictive du feuillet

λ = Longueur d'onde

φ_1 = Fonction de l'_1 , λ et A

φ_2 = Fonction de l'_2 , λ et B

ρ_d = Coefficient de directivité

δ = Déplacement latéral du rayon émis (fig II-a , annexe II)

Δ = Déplacement vertical du rayon émis (fig II-a , annexe II)

H = Altitude du feuillet

d_o = Distance parcourue par le rayon principal (fig I-d)

d = Distance parcourue par le rayon secondaire (fig I-d)

Le rayonnement d'une surface de l'exitation homogène est donné par; [12]

$$\mathcal{E}_\theta = \mathcal{E}_p \frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1} \frac{\sin \varphi_2}{\varphi_2} \qquad (1)$$

---

[12] R. RIGAL et J. VOGES
Hyperfréquences
Chpitre 8, p258 / Edition EYROLLES, Paris 1959

..../....

avec $$\varphi_1 = \frac{2\pi\, l_1' \cos A}{\lambda} \qquad \text{——— (2)}$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi\, l_2' \cos B}{\lambda} \qquad \text{——— (3)}$$

Si l'on considère le cas où $B = \frac{\pi}{2}$, (le rayonnement dans le plan perpendiculaire à la surface, le plan étant paralèl à $2l_1'$), nous avons ;

$$\frac{P_\theta}{P_p} = \left(\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_p}\right)^2 \simeq \left(\frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1}\right)^2 \qquad \text{——— (4)}$$

$\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_p}$ varie avec φ_1 comme dans la figure (I-b) et le champ ε_θ varie avec A comme dans la figure (I-c) .

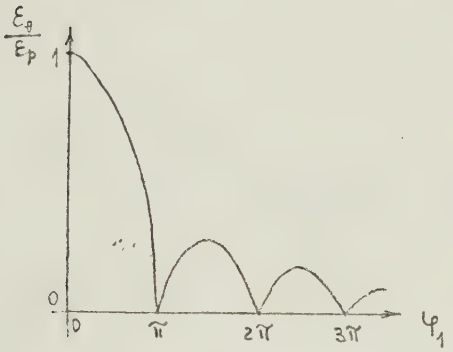


fig. I-b

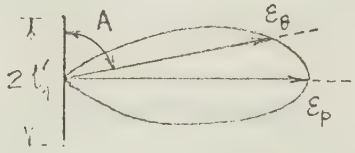


fig. I-c

Prenons la surface d'un feuillet située horizontallement, mais perpendiculaire au plan de la liaison. (fig II-a , annexe II , avec $\delta = 0$)
La reflexion par ce feuillet peut être illustrée comme dans les figures suivantes ;

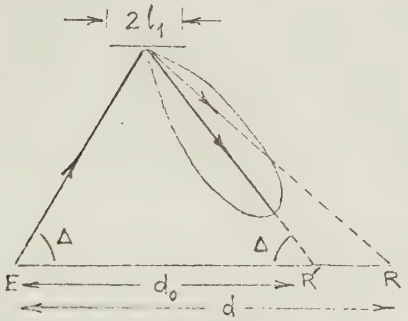


fig. I-d

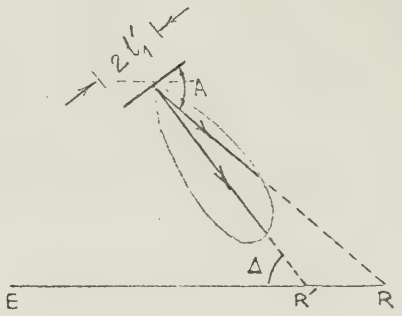


fig. I-e

Le rayon refléchi principalement arrive à R'. Le trajet entre E (émetteur) et R' (recepteur fictif) est d_o . Le point de reception R (recepteur actuel) a une distance d , et la puissance reçue à ce point varie selon le lobe de rayonnement du feuillet de longueur actuelle $2l_1$. (fig I-d).

..../....

Nous pouvons supposer un feuillet fictif de longueur $2l_1'$ dont la surface est perpendiculaire au rayon principal. On prend l'angle A entre le rayon secondaire (vers R) et la surface du feuillet fictif. (fig I-e).

Pour le cas général, remplaçons l_1' par l' et φ_1 par φ .
Nous avons donc ;

$$l' = l\,\Delta \qquad \text{(lorsque } \Delta \text{ est petit)} \qquad \text{——— (5)}$$

Mais , $$\cos A = \sin\left(\pi/2 - A\right) \simeq \frac{d \sim d_o}{d/2} \qquad \text{——— (6)}$$

Alors $$\varphi = 2\pi\left(l_1'/\lambda\right) 2\left(1 \sim d_o/d\right) \qquad \text{——— (7)}$$

Dans la figure 25 , le rapport $\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_p}$ est tracé en fonction de (d_o/d), pour valeurs différentes de (l'/λ).

Si nous limitons le lobe à 3 dB, nous avons dans la figure 25,

$(d_o/d) = 0{,}77$ quand $(l'/\lambda) = 0{,}5$
Alors $\varphi_{3dB} = 4 \times 0{,}5 \times (1 - 0{,}77) = \pi/2{,}2$ ——— (8)

Avec une erreur maximum de 8% au point de 3 dB, nous écrivons,

$$\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_p} = \frac{\sin\varphi}{\varphi} \simeq \left(1 - \frac{\varphi^2}{6}\right) \qquad \text{——— (9)}$$

ou bien $$\frac{P_\theta}{P_p} \simeq 1 - \frac{\varphi^2}{3} \qquad \text{(quand } \varphi^2 \ll 6 \text{)} \qquad \text{——— (10)}$$

Posons le coeffient de directivité ρ_d tel que $\frac{P_\theta}{P_p} = \left[1 - 1/\rho_d^2\right]$ —— (11)
En prenant $S' \simeq (l')^2$, nous avons,

$$\rho_d^2 \simeq 3/\varphi^2 \simeq \frac{3\lambda^2}{S'}\left[4\pi\left(1 \sim d_o/d\right)\right] \qquad \text{——— (12)}$$

A N N E X E . II

Coefficient d'HUYGENS - FRESNEL

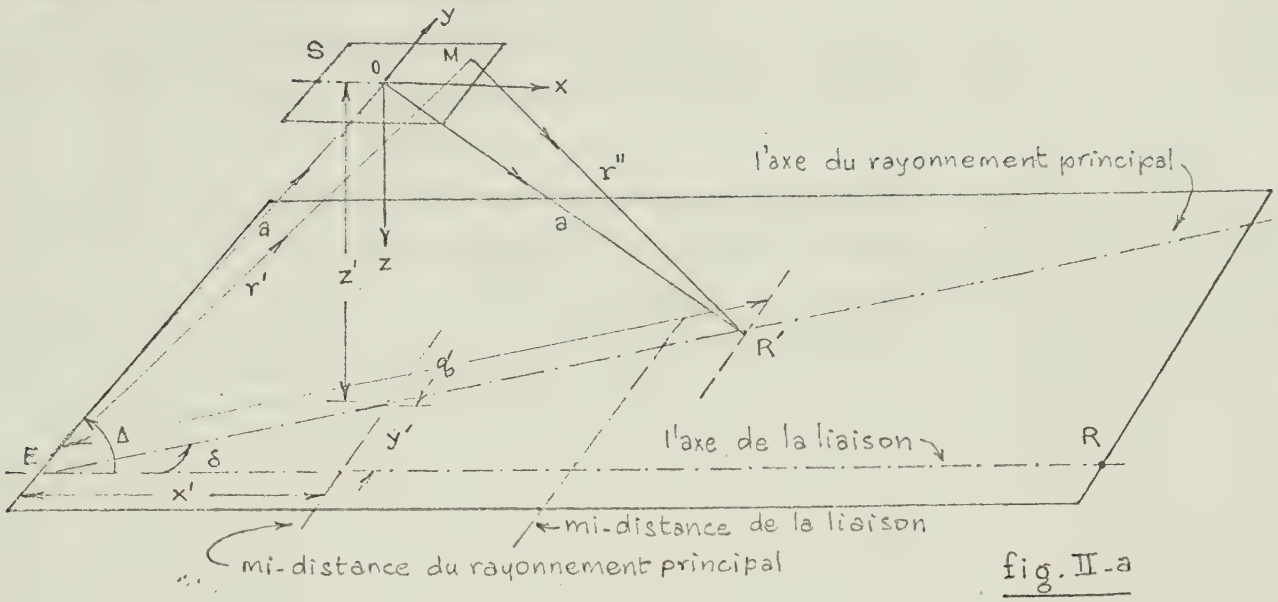


fig. II-a

x , y , z	=	Coordonnées par rapport au milieu du feuillet
a , r' , r"	=	Trajets des rayons
d_o	=	Distance parcourue par le rayon principal
δ	=	Déplacement latéral du rayon émis
Δ	=	Déplacement vetical du rayon émis $\simeq$ l'angle d'incidence moyen d'un rayonnement sur la surface S
M	=	Point quelconque sur le feuillet
R	=	Recepteur actuel
E	=	Emetteur
S	=	Surface du feuillet $\simeq l_1 \times l_2$
β	=	Différence des deux trajets des rayons au milieu et en point quelconque
ϵ_o	=	Champ de crête d'émission
e_m	=	Champ instantané au point M
$E_{r'}$	=	Champ instantané au point R'
λ	=	Longueur d'onde
ω	=	L'angle de rotation de phase $(= 2\pi/\lambda)$
α	=	Fonction de λ et "a" $(= 4/\lambda a)$
$\epsilon_{r'}$	=	Champ de crête à R'

..../....

I , J , P , Q = Intégrals actuels du champ à R'

l_1 = Longueur du feuillet

l_2 = Largeur du feuillet

u , v = Coefficient des limits d'intégration

$\zeta(u), \zeta(v), \eta(u), \eta(v)$ = Intégrals de FRESNEL

ρ_{hf} = Coefficient d'HUYGENS - FRESNEL en espace libre

G_e = Gain d'antenne d'émission

G_r = Gain d'antenne de reception

S_e = Surface d'équivalente d'antenne d'émission

S_r = Surface d'équivalente d'antenne de reception

ρ_{uv} = Coefficient d'HUYGENS - FRESNEL par rapport à l'espace libre

Dans la figure (II-a), nous posons des coordonnées comme suit ;

$O = (0 , 0 , 0)$

$M = (x , y , 0)$

$E = (-x', -y', z')$

$R' = (x', y', z')$

et nous allons prendre,

$EO = OR' = a$

$EM = r'$

$MR' = r''$

$$r' = a + (x^2 + y^2)/ 2a + (xx' + yy')/ a \qquad (1)$$

$$r'' = a + (x^2 + y^2)/ 2a - (xx' + yy')/ a \qquad (2)$$

La différence des deux trajets EOR' et EMR' (fig II-a) est donnée par ;

$$\beta = (x^2 + y^2)/a \qquad (3)$$

Champ émis au point E est supposé $\epsilon_o \cos \omega t$

Champ à M est $e_m = (\epsilon_o / r') \cos (\omega t - \phi)$

Champ à R' est

$$E_{r'} = (\epsilon_o / r'r'') \cos (\omega t - \phi') \quad \text{avec} \quad \phi' = (2\pi / \lambda)\beta \qquad (4)$$

..../....

Le champ à R' dû à une surface dS sur le feuillet S est donnée par ;

$$dE_{r'} = \frac{\epsilon_o}{r'r''} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\beta\right) dS \qquad (5)$$

Si l'on pose $$\epsilon_{r'} = \frac{\epsilon_o}{r'r''} \qquad (6)$$

$$dE_{r'} = \epsilon_{r'} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\beta\right) dS \qquad (7)$$

Si $x_1 < x < x_2$, et $y_1 < y < y_2$, le champ résultant à R' est

$$\int dE_{r'} = E_{r'} = \int_{x_1}^{x_2}\int_{y_1}^{y_2} \epsilon_{r'} \cos\left(\omega t - \frac{(x^2 + y^2)}{a}\frac{2\pi}{\lambda}\right) dx\,dy \qquad (8)$$

Si l'on pose encore $$\alpha^2 = (4/\lambda a) \qquad (9)$$

et $$t' = t - \frac{\pi\alpha^2 x^2}{2\omega} \qquad (10)$$

Formule (8) devient

$$E_{r'} = \epsilon_{r'} \int_{x_1}^{x_2} \left[\int_{y_1}^{y_2} \cos\left(\omega t' - \frac{\pi\alpha^2 y^2}{2}\right) dy \right] dx \qquad (11)$$

Posons que $$I = \int_{y_1}^{y_2} \cos\frac{\pi\alpha^2 y^2}{2}\, dy \qquad (12)$$

et $$J = \int_{y_1}^{y_2} \sin\frac{\pi\alpha^2 y^2}{2}\, dy \qquad (13)$$

Formule (11) devient

$$E_{r'} = \epsilon_{r'} \int_{x_1}^{x_2} \left[I\cos\omega t' + J\sin\omega t' \right] dx \qquad (14)$$

Remplaçons t' de formule (14) par (10) et posons

$$P = \int_{x_1}^{x_2} \cos\frac{\pi\alpha^2 x^2}{2}\, dx \qquad (15)$$

$$Q = \int_{x_1}^{x_2} \sin\frac{\pi\alpha^2 x^2}{2}\, dx \qquad (16)$$

Formule (14) devient

$$E_{r'} = \epsilon_{r'} \left[(IP - JQ)\cos\omega t + (IQ + JP)\sin\omega t \right] \qquad (17)$$

..../....

Valeur absolue du champ reçu à R' s'écrit ;

$$|E_{r'}|^2 = \epsilon_{r'}^2 \left[(IP - JQ)^2 + (IQ + JP)^2 \right] \qquad (18)$$

Posons que $\rho_{hf} = \dfrac{|E_{r'}|}{\epsilon_o}$.

Par la formule (6) et simplifiant la formule (18) , nous avons ;

$$\rho_{hf}^2 = \left(\frac{1}{r'r''}\right)^2 \left[(I^2 + J^2)(P^2 + Q^2) \right] \qquad (19)$$

Si $-l_1 < x < l_1$ et $-l_2 < y < l_2$, les formules (12) à (16) peuvent être écrites ;

$$I = 2 \int_0^{l_2} \cos \frac{\pi \alpha^2 l_2^2}{2} \, dl_2 \qquad (20)$$

$$J = 2 \int_0^{l_2} \sin \frac{\pi \alpha^2 l_2^2}{2} \, dl_2 \qquad (21)$$

$$P = 2 \int_0^{l_1} \cos \frac{\pi \alpha^2 l_1^2}{2} \, dl_1 \qquad (22)$$

$$Q = 2 \int_0^{l_1} \sin \frac{\pi \alpha^2 l_1^2}{2} \, dl_1 \qquad (23)$$

Les Intégrals de FRESNEL sont définis par ;

$$\left.\begin{aligned} \zeta(u) &= \int_0^u \cos \frac{\pi u^2}{2} \, du \\ \eta(u) &= \int_0^u \sin \frac{\pi u^2}{2} \, du \\ \zeta(v) &= \int_0^v \cos \frac{\pi v^2}{2} \, dv \\ \eta(v) &= \int_0^v \sin \frac{\pi v^2}{2} \, dv \end{aligned}\right\} \qquad (24)$$

Posons que $u = \alpha l_1$ et $v = \alpha l_2$ (25)

..../....

Remplçons (25) dans (20) à (23)

$$\left.\begin{aligned} I &= 2\int_0^{V/\alpha} \cos\frac{\pi v^2}{2}\, d(V/\alpha) = \frac{2}{\alpha}\int_0^{V} \cos\frac{\pi v^2}{2}\, dV \\ J &= 2\int_0^{V/\alpha} \sin\frac{\pi v^2}{2}\, d(V/\alpha) = \frac{2}{\alpha}\int_0^{V} \sin\frac{\pi v^2}{2}\, dV \\ P &= 2\int_0^{U/\alpha} \cos\frac{\pi u^2}{2}\, d(U/\alpha) = \frac{2}{\alpha}\int_0^{U} \cos\frac{\pi u^2}{2}\, du \\ Q &= 2\int_0^{U/\alpha} \sin\frac{\pi u^2}{2}\, d(U/\alpha) = \frac{2}{\alpha}\int_0^{U} \sin\frac{\pi u^2}{2}\, du \end{aligned}\right\} \quad (26)$$

Les formules (24) à (26) donnent ;

$$\left.\begin{aligned} I &= \frac{2}{\alpha}\,\zeta(V) \\ J &= \frac{2}{\alpha}\,\eta(V) \\ P &= \frac{2}{\alpha}\,\zeta(U) \\ Q &= \frac{2}{\alpha}\,\eta(U) \end{aligned}\right\} \quad (27)$$

Remplaçons (27) dans (19) ;

$$\rho_{hf}^2 = \left(\frac{1}{r'r''}\right)^2 \left(\frac{16}{\alpha^4}\right) \left[\zeta^2(v) + \eta^2(v)\right]\left[\zeta^2(u) + \eta^2(u)\right] \quad (28)$$

Posons que ; $f(v) = \left[\zeta^2(v) + \eta^2(v)\right]$

et ; $f(u) = \left[\zeta^2(u) + \eta^2(u)\right]$ (29)

Puisque $r' \simeq r'' \simeq a$

La formule (28) devient

$$\rho_{hf}^2 = \frac{1}{a^4}\,\frac{16}{\alpha^4}\, f(u)\, f(v)$$

D'après la formule (9), nous avons ;

$$\rho_{hf}^2 = \frac{\lambda^2}{a^2}\, f(u)\, f(v) \quad (30)$$

avec $a \simeq (d_o/2)$,

nous avons ;

$$\rho_{hf}^2 = \frac{4\lambda^2}{d_o^2}\, f(u)\, f(v) \quad (31)$$

..../....

Formule (31) donne le coefficient d'HUYGENS - FRESNEL en espace libre , où il n'est pas tenu compte des gains d'antenne. (Veuillez remarquer que nous avons calculé ρ_{hf}^2 avec r' , r").

Donc ρ_{hf}^2 est une fonction entre les antennes isotropes en espace libre.

Si nous posons ; ρ_{uv} = coefficient d'HUYGENS - FRESNEL par rapport à l'espace libre,

Nous aurons ; $$\rho_{uv}^2 = 4\, f(u)\, f(v) \qquad (32)$$

Si nous introduisons les gains d'antenne, $G_e = \frac{4\pi S_e}{\lambda^2}$ et $G_r = \frac{4\pi S_r}{\lambda^2}$;
La formule (31) devient ;

$$\left[G_e G_r \rho_{hf}^2 \right] = 4 \frac{\lambda^2}{d_o^2} \frac{4\pi S_e}{\lambda^2} \frac{4\pi S_r}{\lambda^2} f(u) f(v)$$

ou $$\frac{P_r}{P_e} = \frac{64\, \pi^2\, S_e S_r}{d_o^2 \lambda^2} f(u) f(v) \qquad (33)$$

La formule (33) est en accord avec la formule donnée par Crawford [8-a]. Dans nos intérêts, nous utiliserons la formule (32) qui donne un coefficient d'HUYGENS - FRESNEL par rapport à l'espace libre entre les antennes isotropes.

Sur la figure 26 nous avons tracé le coefficient $[\rho_{uv} / 0,5]$ en fonction de u v d'où d'après la formule (25),

$$u\, v = (\alpha l_1)(\alpha l_2) = \alpha^2 S \qquad (l_1 \times l_2 \simeq S)$$

et d'après la formule (9) ,

$$u\, v = \frac{8\, S}{\lambda\, d_o} \qquad (34) \qquad (a \simeq d_o / 2)$$

..../....

[8-a] H.T. FRISS and A.B. CRAWFORD
A reflection theory for Propagation beyond the horizon.
(The Bell system technical journal, N° 36 , p.629)

Nous avons remarqué [11-a] que ,

$$\left.\begin{aligned} \zeta(u) &= \zeta(v) \simeq u = v \\ \eta(u) &= \eta(v) \simeq 0 \end{aligned}\right\} \qquad (35)$$

quand u ou v est petit,
et que,

$$\zeta(u) = \zeta(v) = \eta(u) = \eta(v) = 0,5 \qquad (36)$$

quand u ou v est grand.

Nous écrivons finalement le coefficient d'HUYGENS - FRESNEL par rapport à l'espace libre comme suit ;

1°) lorsque u ou v est petit, $f(u)\, f(v) \simeq u^2 v^2$

$$\text{et} \quad \rho_{uv}^2 = 4u^2v^2 = 4\left(\frac{8S}{d_o}\right)^2 \lambda^{-2} \qquad (37)$$

2°) lorsque u ou v est grand, $f(u)\, f(v) = 0,25$

$$\text{et} \quad \rho_{uv}^2 = 1 \qquad (38)$$

[11-a] G. BRUHAT
Optique
(Chapitre X , 4ème édition, p. 187)

9. REFERENCES

(1) L. BOITHIAS et J. BATTESTI
Les faisceaux Hertziens transhorizon de haute qualité
(Annales des Télécommunications, tome 20, N°s 7-8) juillet-août 1965

(2) K. BULLINGTON
Characteristics of beyond the Horizon radiotransmission
(Proceedings of the I.R.E., Vol. 43, N° 10 p. 1175) october 1955

(3) L.G. TROLESE
Characteristics of tropospheric scattered fields
(Proceedings of the I.R.E., Vol. 43, N° 10, p. 1300) october 1955

(4) K. BULLINGTON
Results of propagation tests at 505 Mc/s and 4090 Mc/s beyond the Horizon Path.
(Proceedings of the I.R.E., Vol. 43, N° 10, p. 1306) october 1955

(5) A. B. CRAWFORD, D.C. HOGG and W.H. KUMMER
Studies in tropospheric propagation beyond the horizon.
(The Bell system technical journal, vol. 38, N° 5, p. 1067) sept. 1959

(6) FOLKE EKLUND and STURE WICKERTS
Wave lenght dependence of microwave propagation for beyond the radio Horizon.
(Radio Science, Vol. 3 (New servics), N° 11, p. 1066) novembre 1968

(7) H.G. BOOKER and W.E. GORDON
A theory of Radio scattering in the troposphere
(Proceedings of the I.R.E., N° 38, p. 401) april 1950

(8) H.T. FRIIS and A.B. CRAWFORD
A réflection theory for propagation beyond the horizon
(The Bell system technical journal, N° 36, p. 627), may 1957

(9) F. DU CASTEL
Propagation troposphérique et faisceaux hertziens transhorizon
(Editions CHIRON, Paris - chapitre cinquième, p. 185) 1961

(10) P. BECKERMANN and A. SPIZZICHINO
The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces
(Pergamon Press, électromagnetic waves Vol. 4 - chapter 19, p. 418) 1963

(11) G. BRUHAT
Optique
(Edition MASSON, Paris - 4ème édition, chapitre X, p. 179) 1954

(12) R. RIGAL et J. VOGES
Hyperfréquences
(Edition EYROLLES, Paris - chapitre 8, p. 258) 1959

---

10. TABLEAUX.

CARACTERISTIQUES DES LIAISONS

fréquences (MHz)	émeteur à	puissance émise		antenne d'émission			pertes dans la ligne de l'émétteur à l'antenne	recepteur à	distance (Km)	antenne de reception			pertes dans la ligne de l'antenne au recepteur	affaiblissement en espace libre antenne isotr. (dB)
		W	dBm	dia. (m)	gain (dB)	angle d'ouv. (mR)				dia.	gain	angle d'ouv. (mR)		
460	LANNION	40*	46*	12	32,8	78,5	1 dB	VILLEDIEU	162	4,85	25,7	176	1 dB	130
								CONCHES	325	12	32,8	78,5	2 dB	136
2220		9000	69,5	1,6	29	122,5	1,4 dB	VILLEDIEU	162	cornet	17	450	3,4 dB	143,5
								CONCHES	325	3,3	35	60	1 dB	149,5

* 35 W et 45,5 dBm aux janvier et février.

TABLEAU - 1

AFFAIBLISSEMENTS DES LIAISONS

fréquences (MHz)	liaison	époque des mésures	puissance émise, gain d'antenne et pertes dans lignes (dBm)	puissance reçue actuelle** (dBm)	affaiblissement total entre antennes isotropes** (dB)	affaiblissement espace libre entre antennes isotropes (dB)	affaiblissement par rapport à espace libre** (dB)
460	LANNION VILLEDIEU	juin-juil 71.	102,5	-79,5	182	130	52
		jan-fev. 72.	102	-96,5	198,5	130	68,5
	LANNION CONCHES	mai à juil 71.	108,5	-99,5	208	136	72
		mars 72.	108,5	-106,5	215	136	79
2220	LANNION VILLEDIEU	juin-juil 71.	110,5	-94	204,5	143,5	61
		jan-fev. 72.	110,5	-104,7	215,2	143,5	71,7
	LANNION CONCHES	mai à juil 71.	131	-103,5	234,5	149,5	85
		mars 72.	131	-109,5	240,5	149,5	91

** pendant 50% de temps, d'après les bandes enrégistrées.

TABLEAU - 2

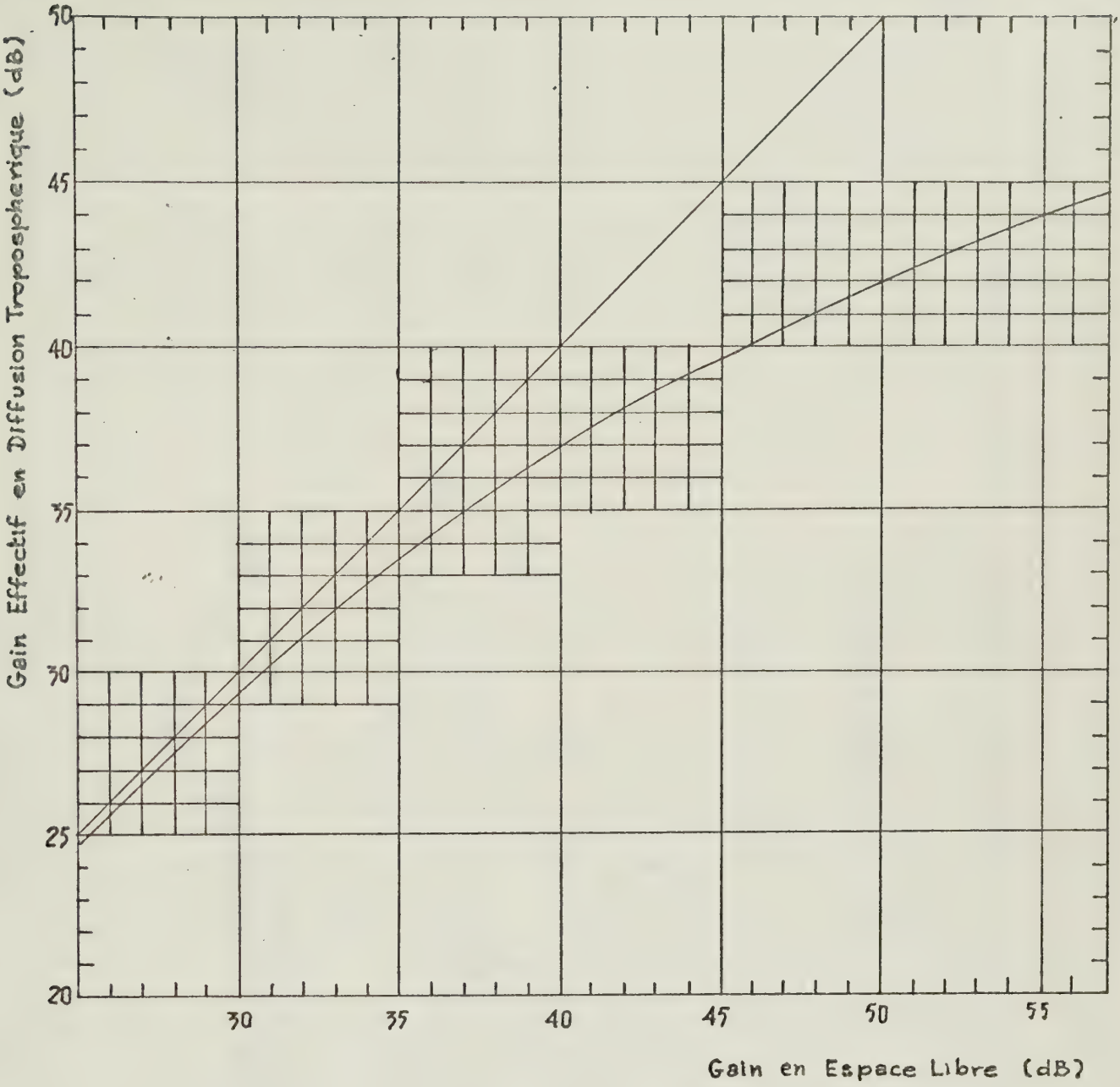
LOIS EXPERIMENTAUX DE LA FREQUENCE

PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE.

LIAISON.	DISTANCE.	EPOQUE DES MEASURES.	q		
			1%	50%	99%
LANNION - CONCHES.	325 Km	mai à juil.71.	2,34	1,9	0,88
		mars.72.	1,61	1,76	1,17
		année.71-72.	2,3	1,6	1,17
LANNION - VILLEDIEU.	162 Km	juin-juil.71.	1,83	1,32	0,88
		jan-fév.72.	1,53	0,47	0,51
		année.71-72.	1,45	0,73	0,5

TABLEAU - 3

11. FIGURES



GAIN EFFECTIF D'UNE ANTENNE

FIG_1

CARTE DES LIAISONS

FIG_2

PROFIL DES LIAISONS

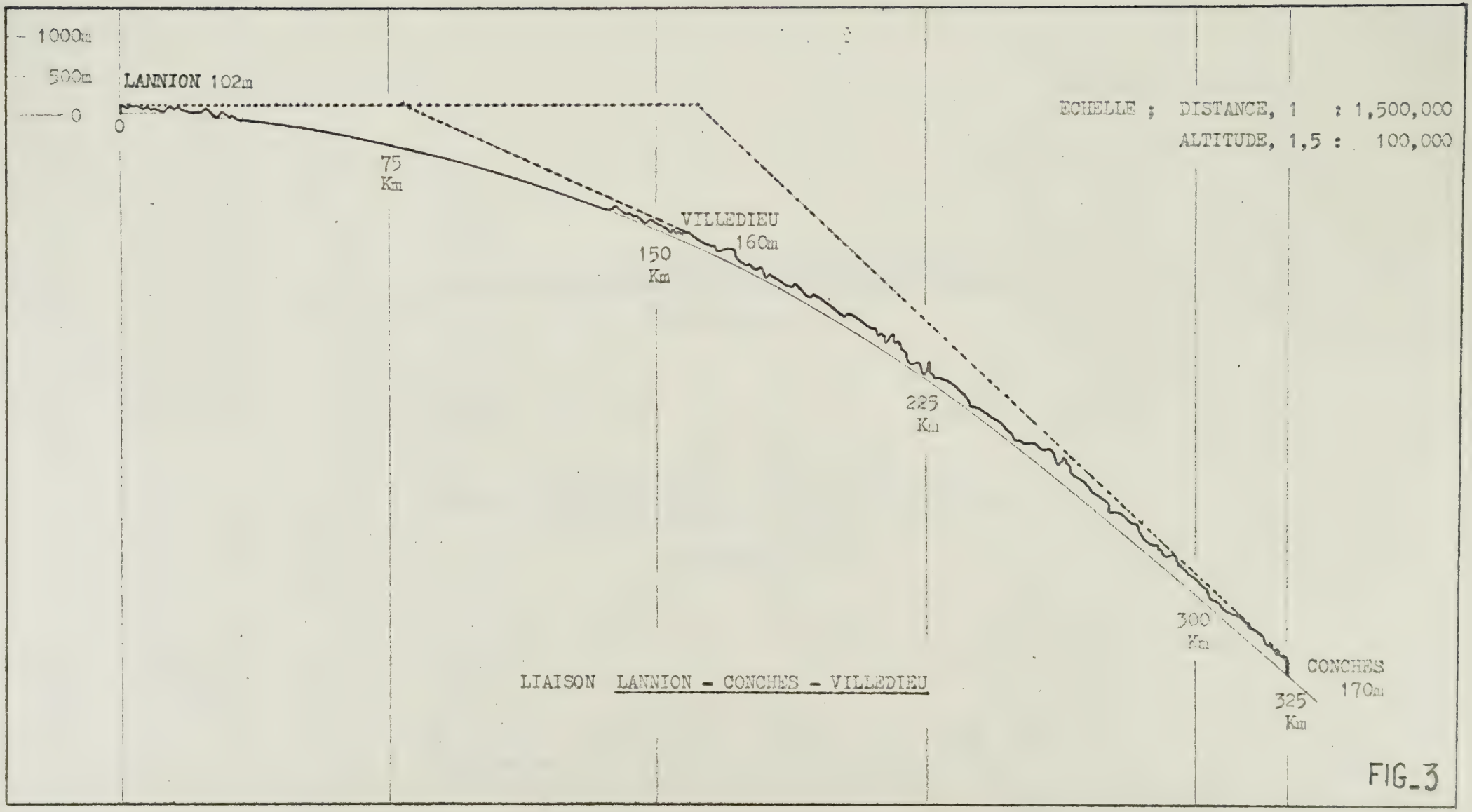
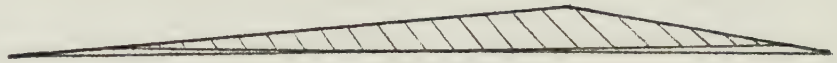


FIG_3

PROFIL DU VOLUME COMMUN

ECHELLE; 1 : 1,500,000

FREQUENCE - 460 MHz.



PLAN VERTICAL

LANNION VILLEDIEU

PLAN HORIZONTAL

FIG.4

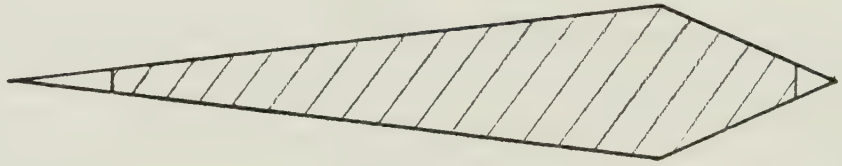
PROFIL DU VOLUME COMMUN

ECHELLE; 1 : 1,500,000

FREQUENCE - 2220 MHz.

PLAN VERTICAL

LANNION VILLEDIEU



PLAN HORIZONTAL

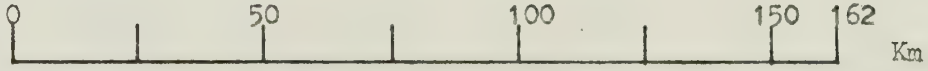
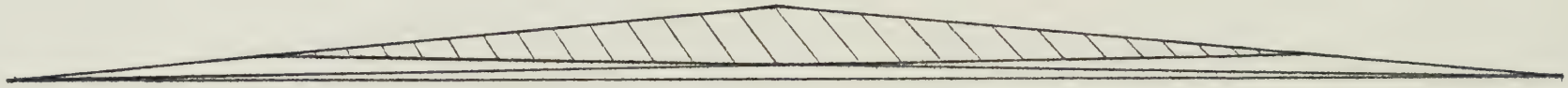


FIG.5

PROFIL DU VOLUME COMMUN

ECHELLE ; 1 : 1,500,000

FREQUENCE - 460 MHz.



PLAN VERTICAL

LANNION

CONCHES

PLAN HORIZONTAL

FIG.6

PROFIL DU VOLUME COMMUN

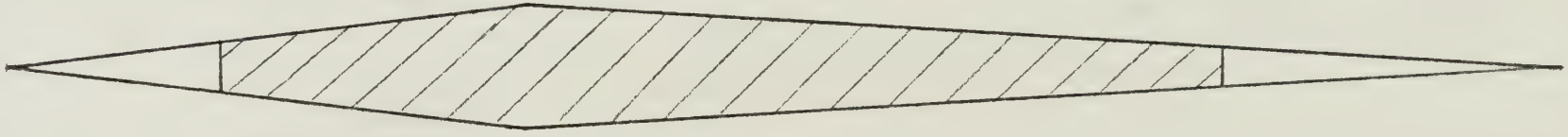
ECHELLE; 1 : 1,500,000

FREQUENCE - 2220 MHz.

PLAN VERTICAL

LANNION

CONCHES



PLAN HORIZONTAL

FIG.7

SCHEMA DE PRINCIPE

EMETTEUR 460 Mz.

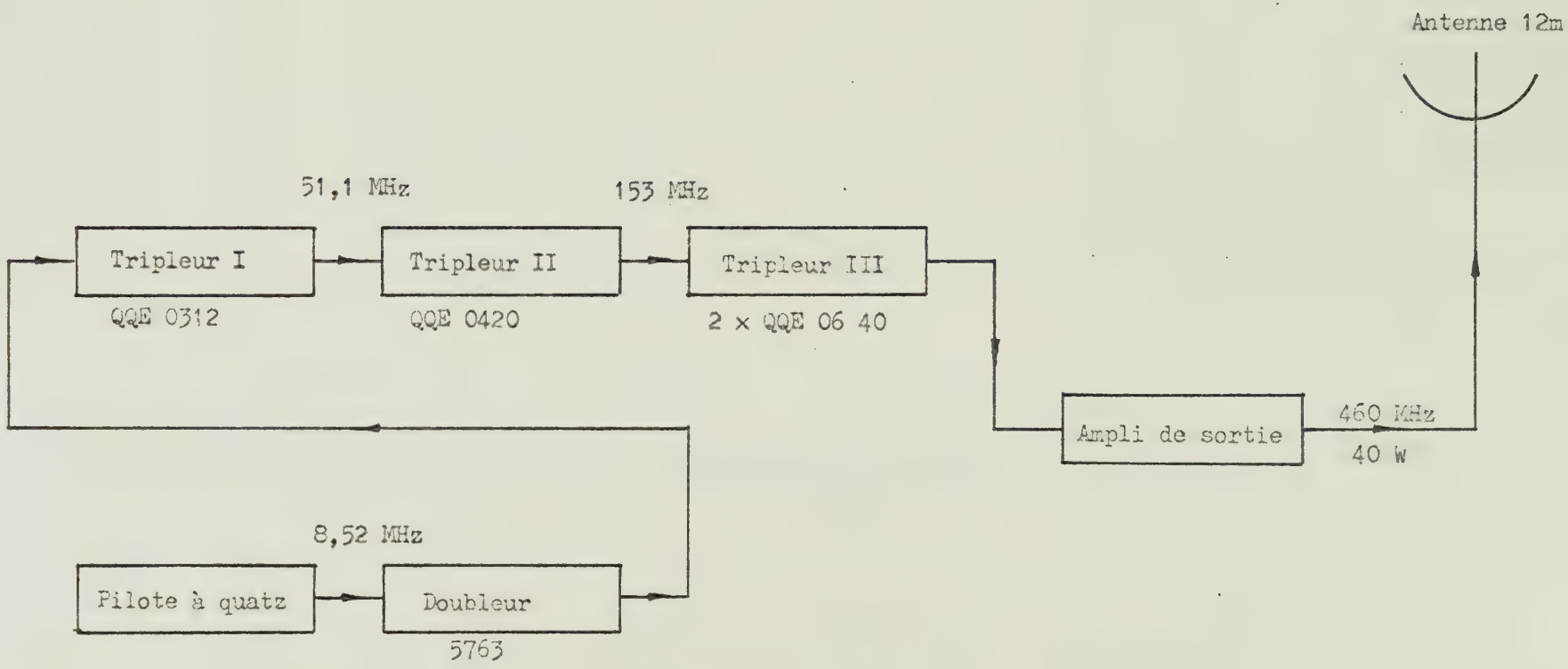


FIG.8

SCHEMA DE PRINCIPE

EMETTEUR 2220 MHz

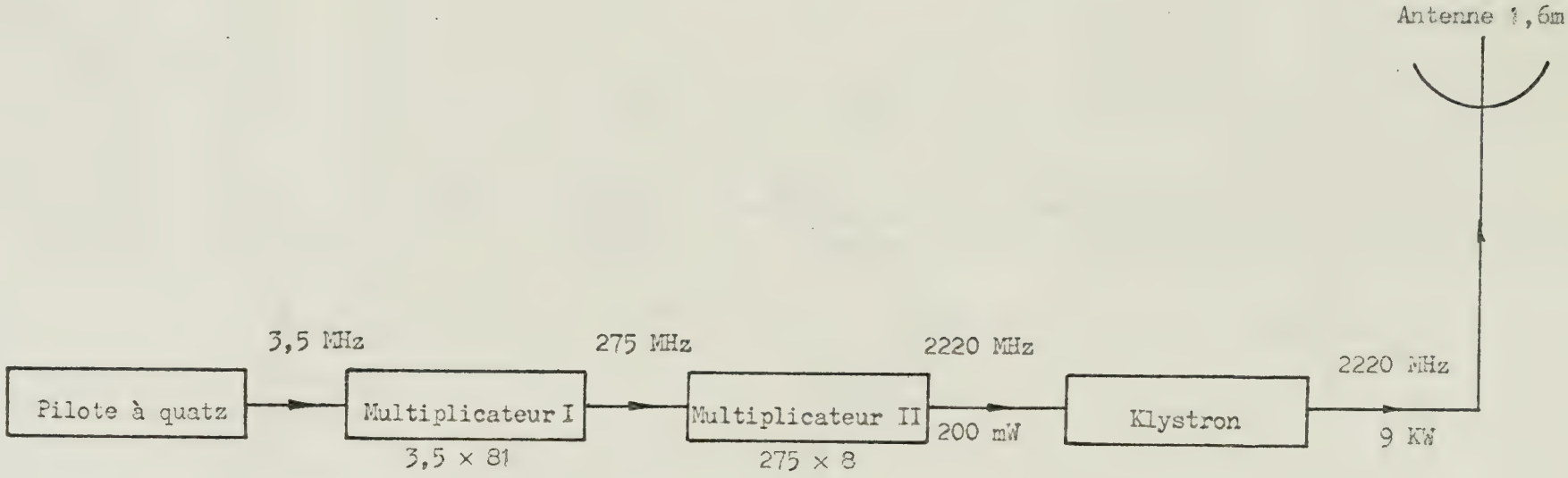


FIG.9

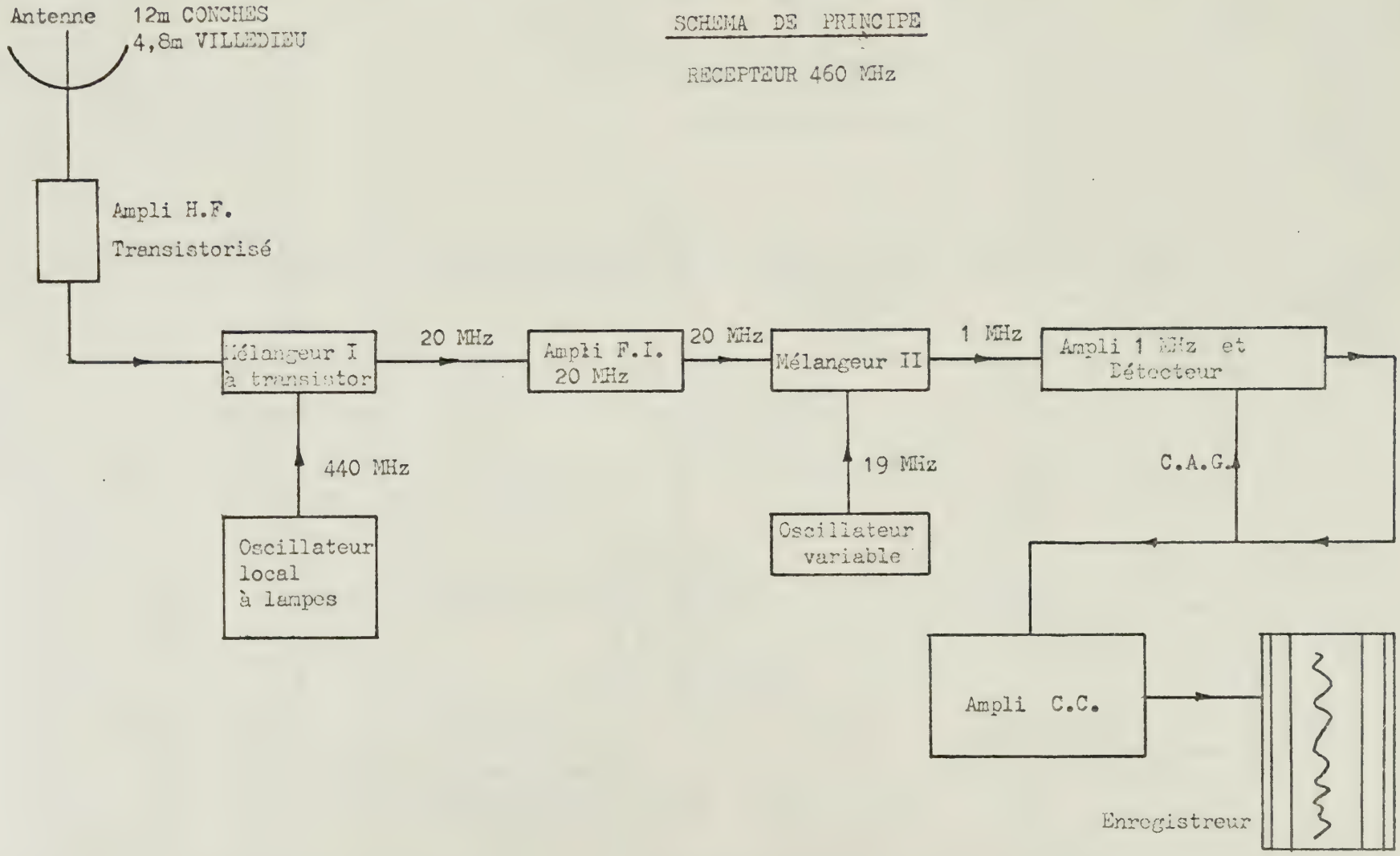

Antenne 12m CONCHES
4,8m VILLEDIEU
SCHEMA DE PRINCIPE
RECEPTEUR 460 MHz
Ampli H.F.
Transistorisé
Mélangeur I
à transistor
20 MHz
Ampli F.I.
20 MHz
20 MHz
Mélangeur II
1 MHz
Ampli 1 MHz et
Détecteur
440 MHz
19 MHz
C.A.G.
Oscillateur
local
à lampes
Oscillateur
variable
Ampli C.C.
Enregistreur

FIG.10

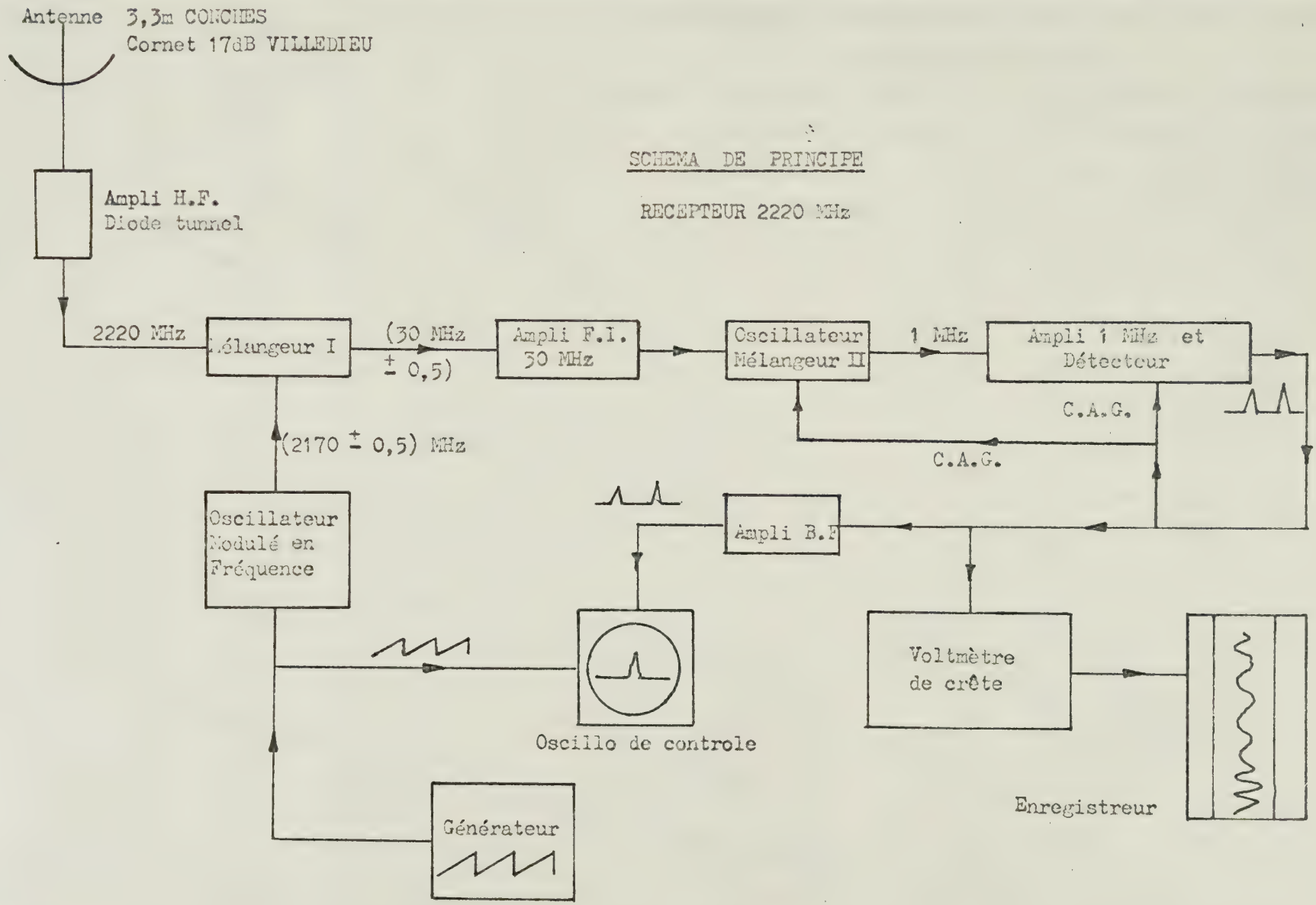

Antenne 3,3m CONCHES
Cornet 17dB VILLEDIEU
SCHEMA DE PRINCIPE
RECEPTEUR 2220 MHz
Ampli H.F.
Diode tunnel
2220 MHz
Mélangeur I
(30 MHz ± 0,5)
Ampli F.I. 30 MHz
Oscillateur Mélangeur II
1 MHz
Ampli 1 MHz et Détecteur
C.A.G.
C.A.G.
(2170 ± 0,5) MHz
Oscillateur Modulé en Fréquence
Ampli B.F
Oscillo de controle
Voltmètre de crête
Enregistreur
Générateur

FIG.11

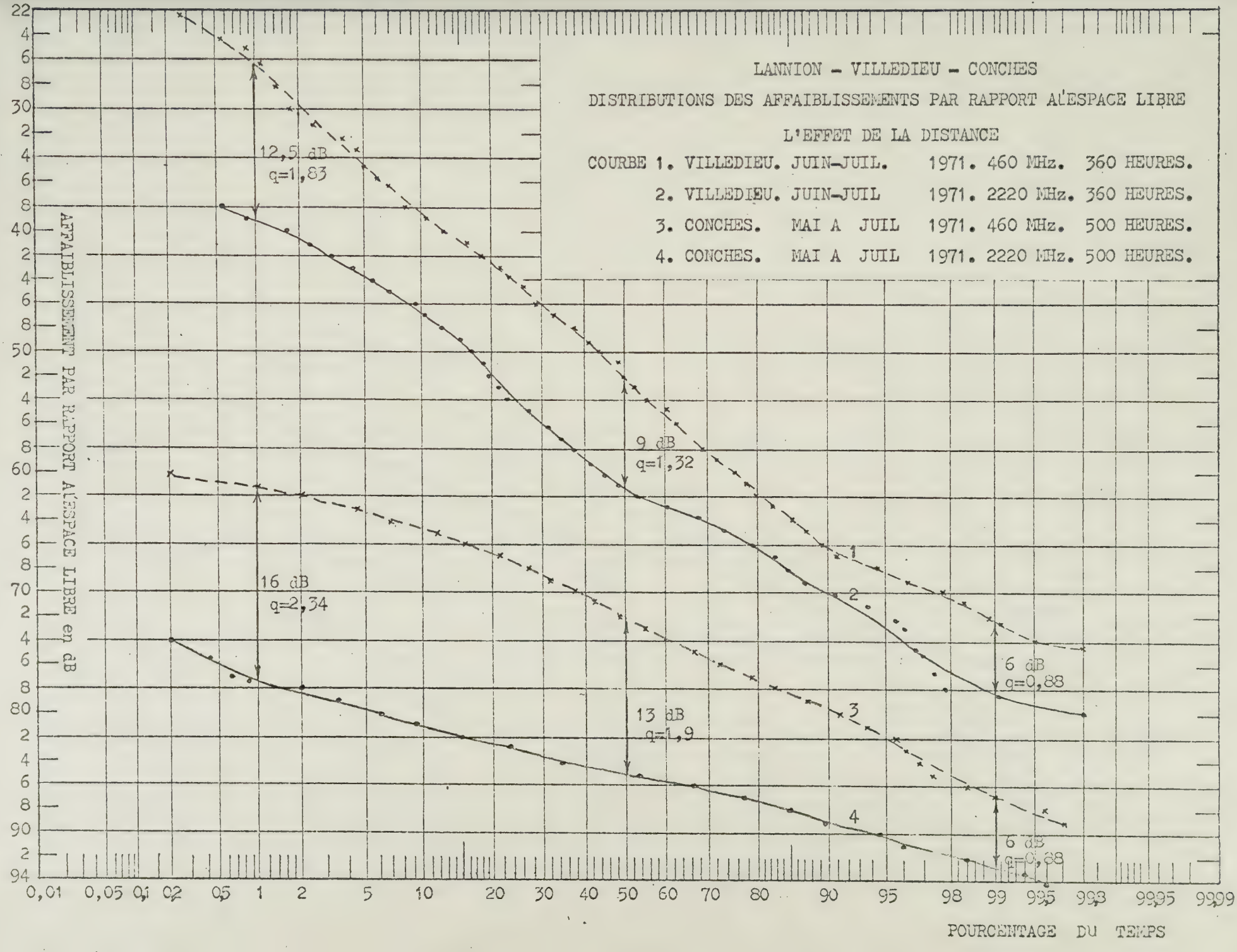

LANNION - VILLEDIEU - CONCHES
DISTRIBUTIONS DES AFFAIBLISSEMENTS PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE
L'EFFET DE LA DISTANCE
COURBE 1. VILLEDIEU. JUIN-JUIL. 1971. 460 MHz. 360 HEURES.
2. VILLEDIEU. JUIN-JUIL 1971. 2220 MHz. 360 HEURES.
3. CONCHES. MAI A JUIL 1971. 460 MHz. 500 HEURES.
4. CONCHES. MAI A JUIL 1971. 2220 MHz. 500 HEURES.
12,5 dB
q=1,83
9 dB
q=1,32
16 dB
q=2,34
13 dB
q=1,9
6 dB
q=0,88
6 dB
q=0,88
AFFAIBLISSEMENT PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE en dB
POURCENTAGE DU TEMPS
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99

FIG.12

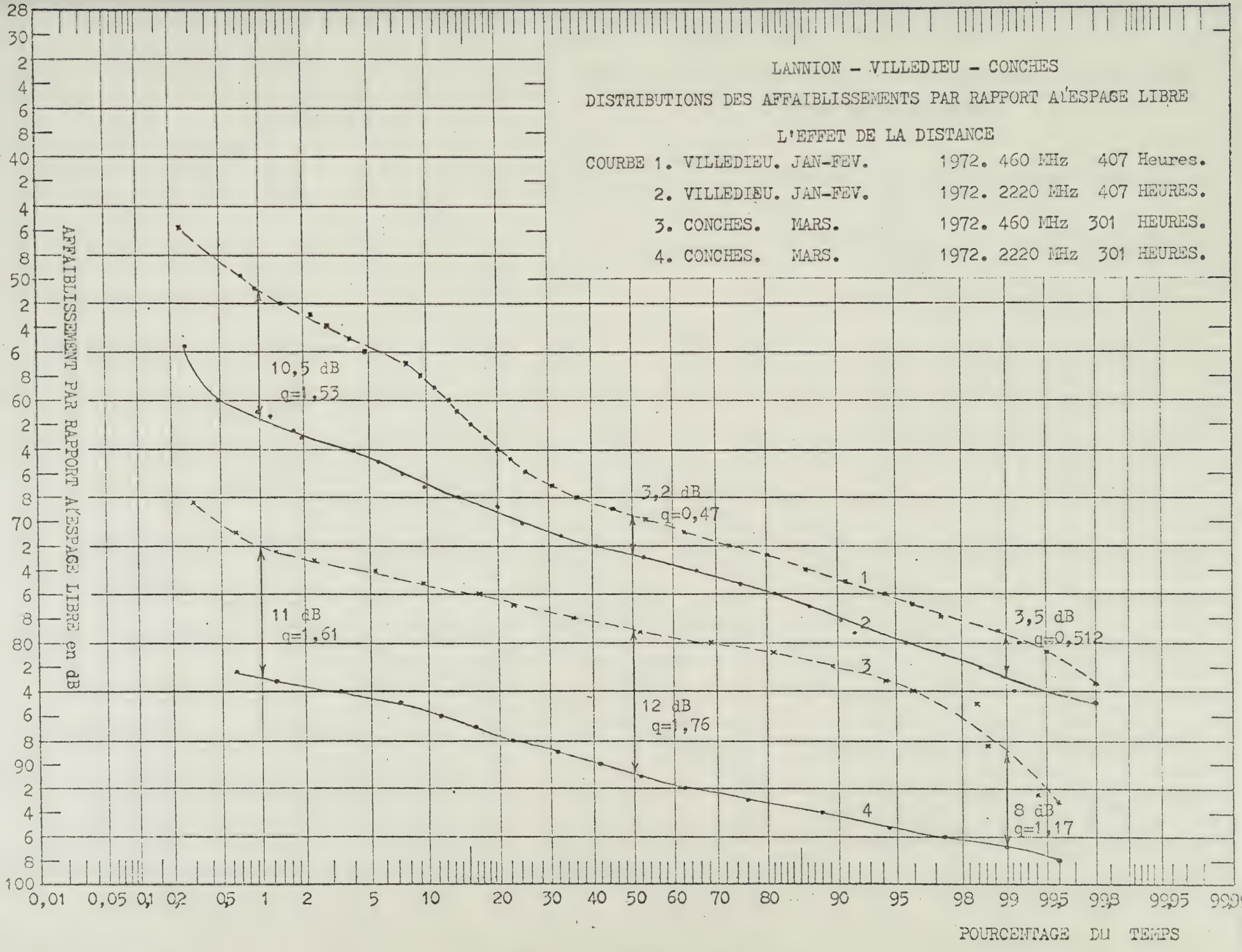

LANNION – VILLEDIEU – CONCHES
DISTRIBUTIONS DES AFFAIBLISSEMENTS PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE
L'EFFET DE LA DISTANCE
COURBE 1. VILLEDIEU. JAN-FEV. 1972. 460 MHz 407 Heures.
2. VILLEDIEU. JAN-FEV. 1972. 2220 MHz 407 HEURES.
3. CONCHES. MARS. 1972. 460 MHz 301 HEURES.
4. CONCHES. MARS. 1972. 2220 MHz 301 HEURES.
10,5 dB
q=1,53
3,2 dB
q=0,47
11 dB
q=1,61
3,5 dB
q=0,512
12 dB
q=1,76
8 dB
q=1,17
1
2
3
4
AFFAIBLISSEMENT PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE en dB
POURCENTAGE DU TEMPS
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99

FIG.13

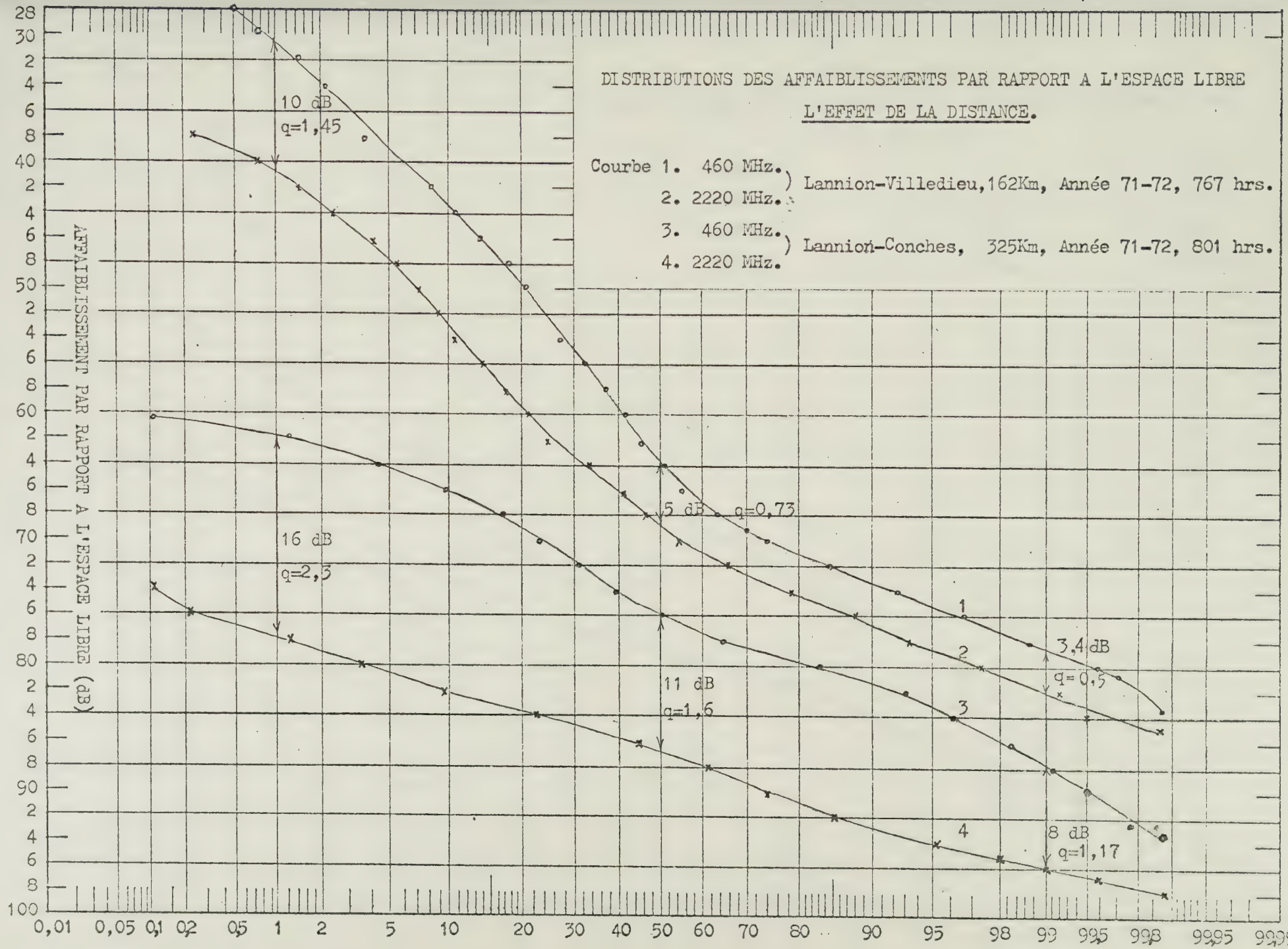
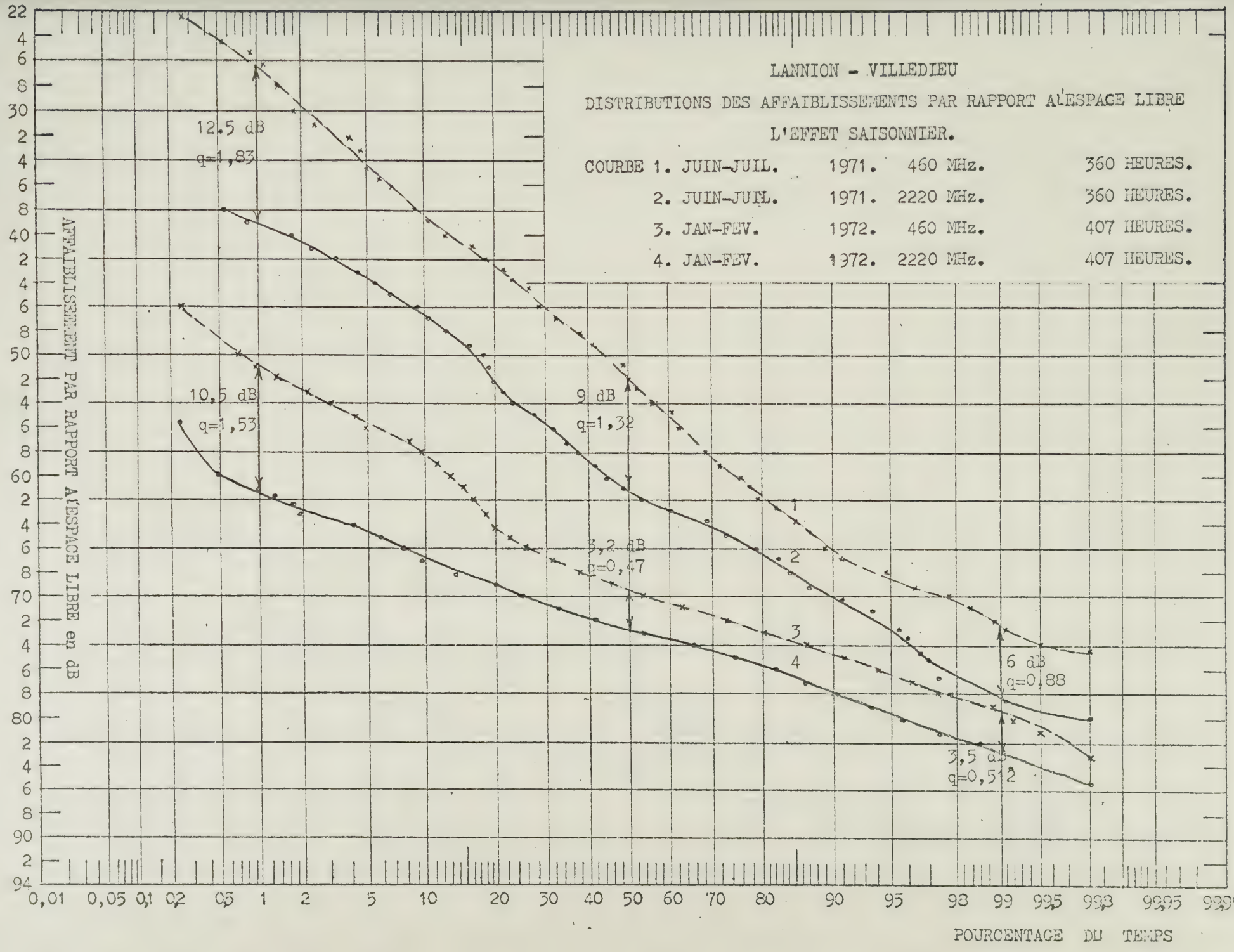

DISTRIBUTIONS DES AFFAIBLISSEMENTS PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE
L'EFFET DE LA DISTANCE.
Courbe 1. 460 MHz.) Lannion-Villedieu, 162Km, Année 71-72, 767 hrs.
2. 2220 MHz.)
3. 460 MHz.) Lannion-Conches, 325Km, Année 71-72, 801 hrs.
4. 2220 MHz.)
10 dB
q=1,45
16 dB
q=2,3
5 dB q=0,73
11 dB
q=1,6
3,4 dB
q=0,5
8 dB
q=1,17
1
2
3
4
AFFAIBLISSEMENT PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE (dB)
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99
POURCENTAGE DU TEMPS

FIG-14


LANNION - VILLEDIEU
DISTRIBUTIONS DES AFFAIBLISSEMENTS PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE
L'EFFET SAISONNIER.
COURBE 1. JUIN-JUIL. 1971. 460 MHz. 360 HEURES.
2. JUIN-JUIL. 1971. 2220 MHz. 360 HEURES.
3. JAN-FEV. 1972. 460 MHz. 407 HEURES.
4. JAN-FEV. 1972. 2220 MHz. 407 HEURES.
12,5 dB
q=1,83
10,5 dB
q=1,53
9 dB
q=1,32
3,2 dB
q=0,47
6 dB
q=0,88
3,5 dB
q=0,512
1
2
3
4
AFFAIBLISSEMENT PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE en dB
POURCENTAGE DU TEMPS
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99

57

FIG.15

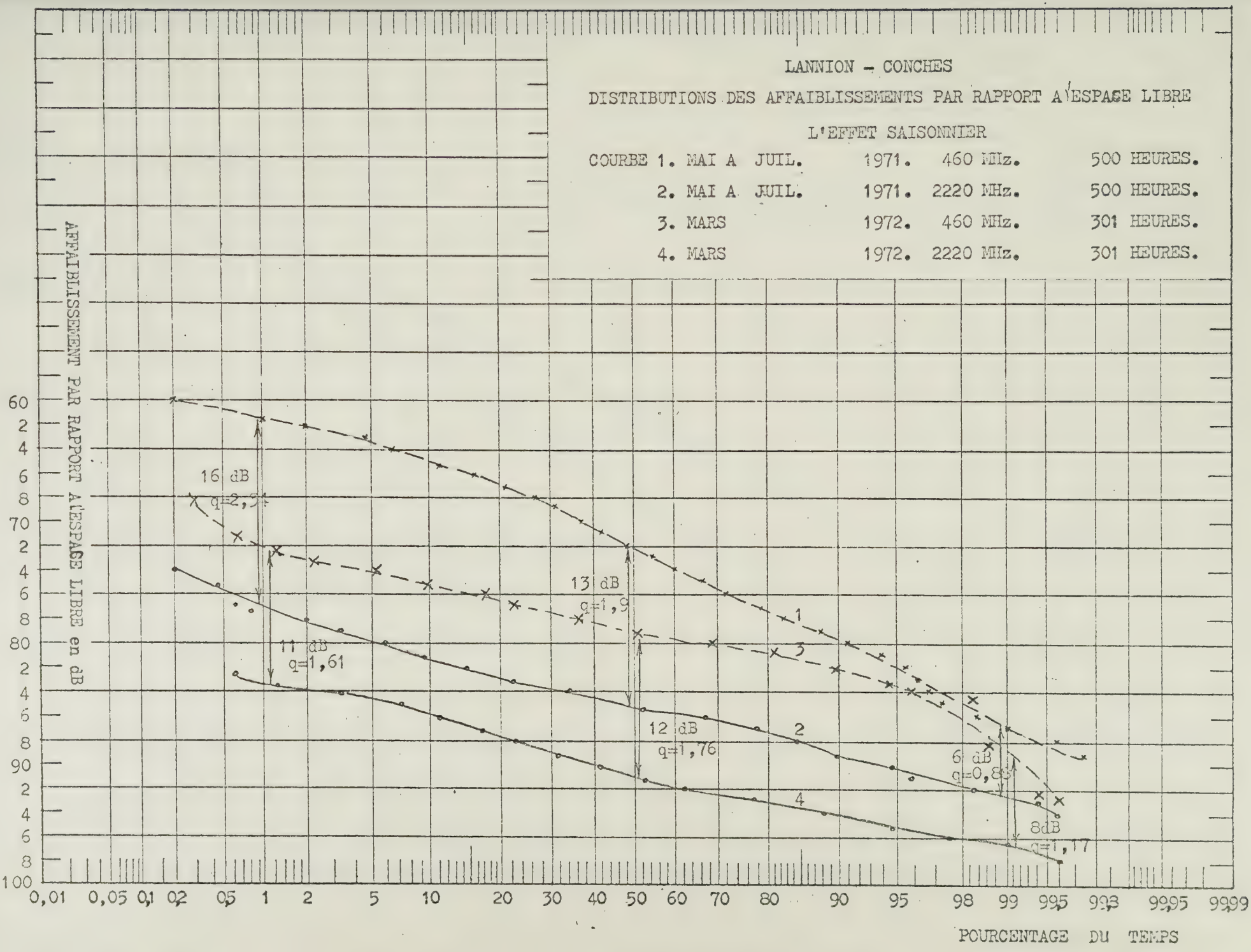

LANNION – CONCHES
DISTRIBUTIONS DES AFFAIBLISSEMENTS PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE
L'EFFET SAISONNIER
COURBE 1. MAI A JUIL. 1971. 460 MHz. 500 HEURES.
2. MAI A JUIL. 1971. 2220 MHz. 500 HEURES.
3. MARS 1972. 460 MHz. 301 HEURES.
4. MARS 1972. 2220 MHz. 301 HEURES.
AFFAIBLISSEMENT PAR RAPPORT A L'ESPACE LIBRE en dB
POURCENTAGE DU TEMPS
16 dB
q=2,51
13 dB
q=1,9
11 dB
q=1,61
12 dB
q=1,76
6 dB
q=0,83
8dB
q=1,17
1
2
3
4
0,01
0,05
0,1
0,2
0,5
1
2
5
10
20
30
40
50
60
70
80
90
95
98
99
99,5
99,8
99,95
99,99

FIG.16

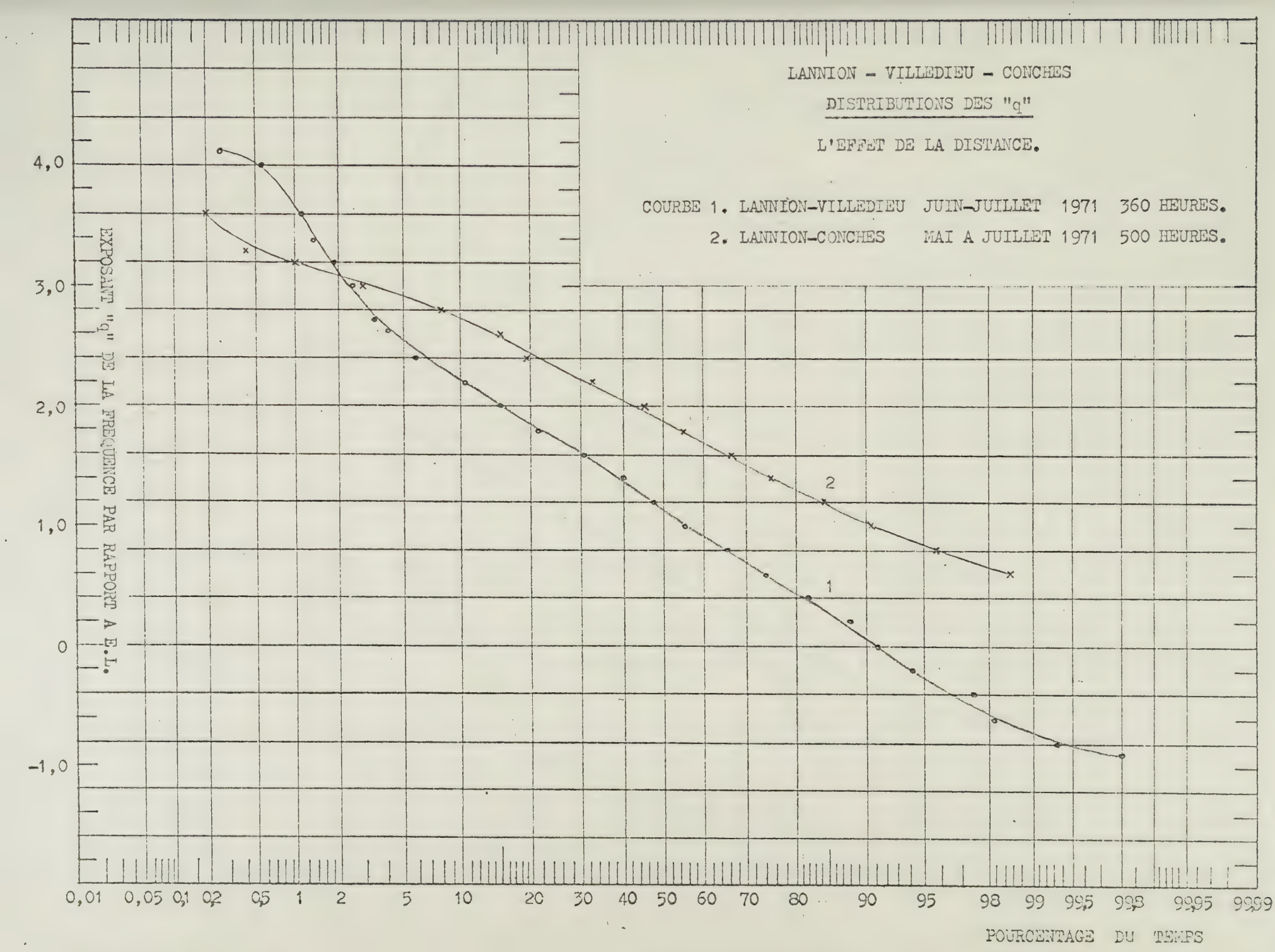

LANNION - VILLEDIEU - CONCHES
DISTRIBUTIONS DES "q"
L'EFFET DE LA DISTANCE.
COURBE 1. LANNION-VILLEDIEU JUIN-JUILLET 1971 360 HEURES.
2. LANNION-CONCHES MAI A JUILLET 1971 500 HEURES.
EXPOSANT "q" DE LA FRÉQUENCE PAR RAPPORT A E.L.
4,0
3,0
2,0
1,0
0
-1,0
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99
POURCENTAGE DU TEMPS
1
2

FIG.17

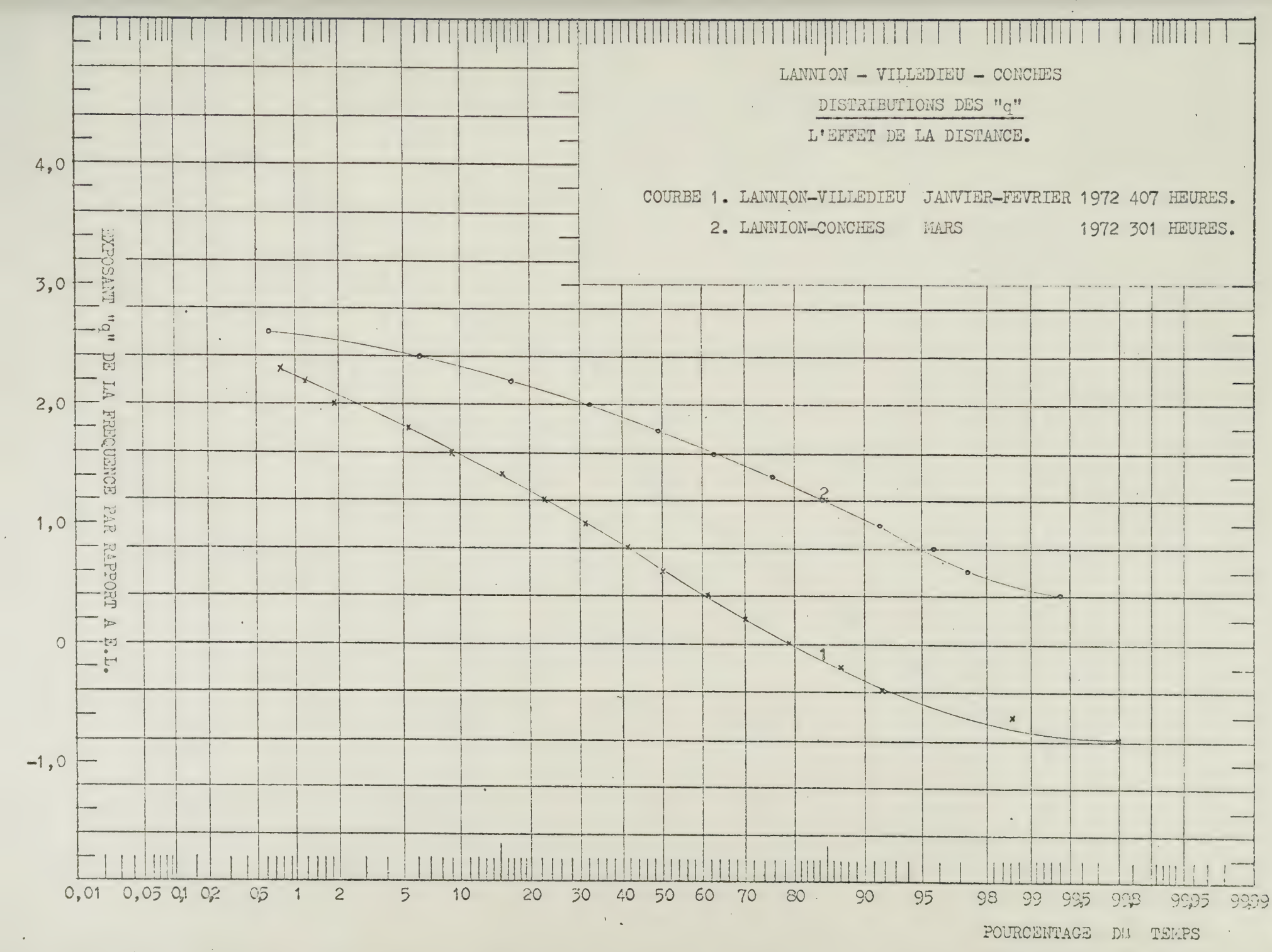

LANNION - VILLEDIEU - CONCHES
DISTRIBUTIONS DES "q"
L'EFFET DE LA DISTANCE.
COURBE 1. LANNION-VILLEDIEU JANVIER-FEVRIER 1972 407 HEURES.
2. LANNION-CONCHES MARS 1972 301 HEURES.
EXPOSANT "q" DE LA FREQUENCE PAR RAPPORT A F.I.
4,0
3,0
2,0
1,0
0
-1,0
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99
POURCENTAGE DU TEMPS
1
2

FIG. 18

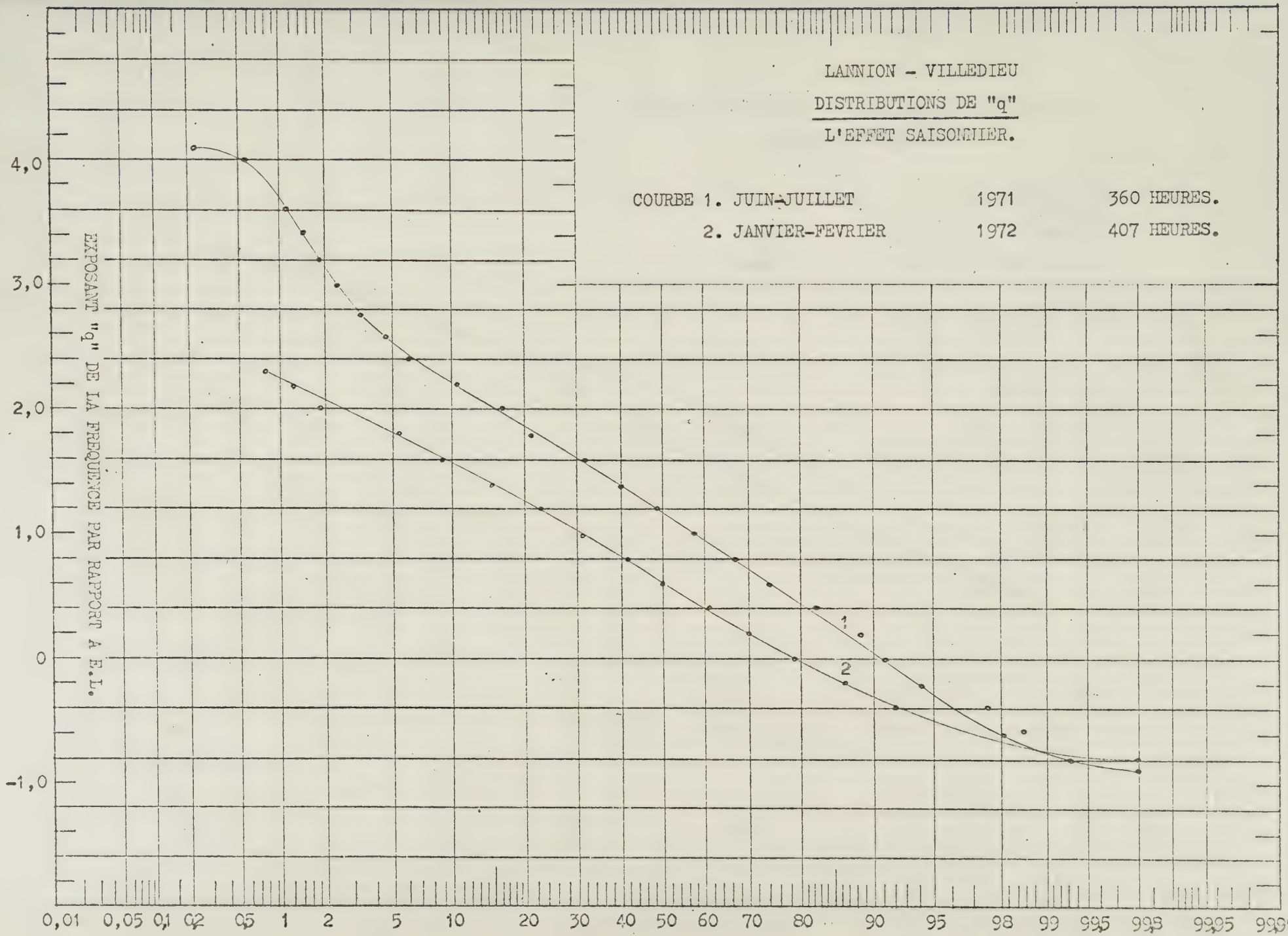

LANNION - VILLEDIEU
DISTRIBUTIONS DE "q"
L'EFFET SAISONNIER.
COURBE 1. JUIN-JUILLET 1971 360 HEURES.
2. JANVIER-FEVRIER 1972 407 HEURES.
EXPOSANT "q" DE LA FREQUENCE PAR RAPPORT A E.L.
4,0
3,0
2,0
1,0
0
-1,0
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99
POURCENTAGE DU TEMPS
1
2

FIG.1

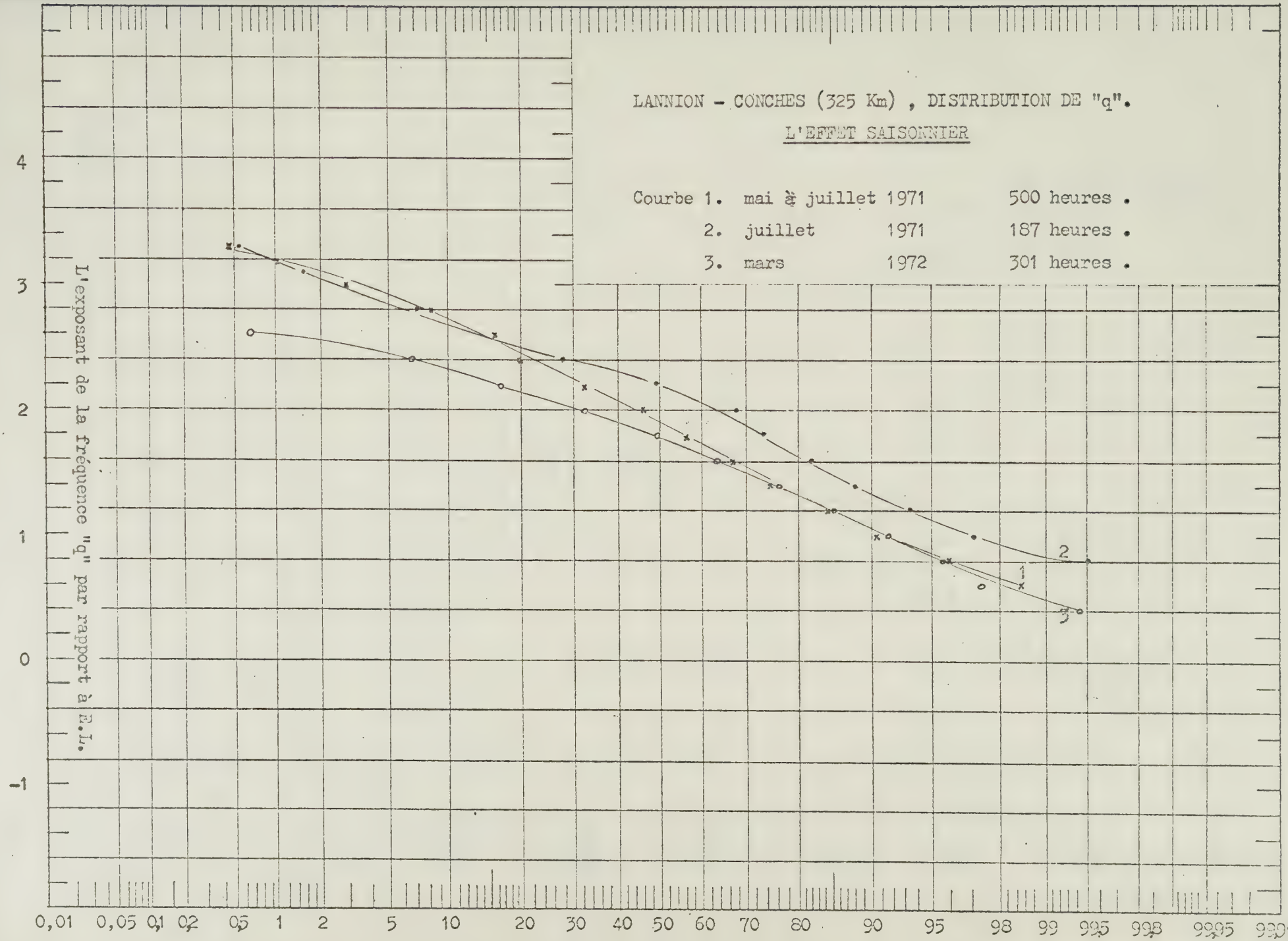

LANNION - CONCHES (325 Km) , DISTRIBUTION DE "q".
L'EFFET SAISONNIER
Courbe 1. mai à juillet 1971 500 heures .
2. juillet 1971 187 heures .
3. mars 1972 301 heures .
l'exposant de la fréquence "b" par rapport à E.L.
4
3
2
1
0
-1
0,01 0,05 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 95 98 99 99,5 99,8 99,95 99,99
POURCENTAGE DU TEMPS
1
2
3

FIG-20

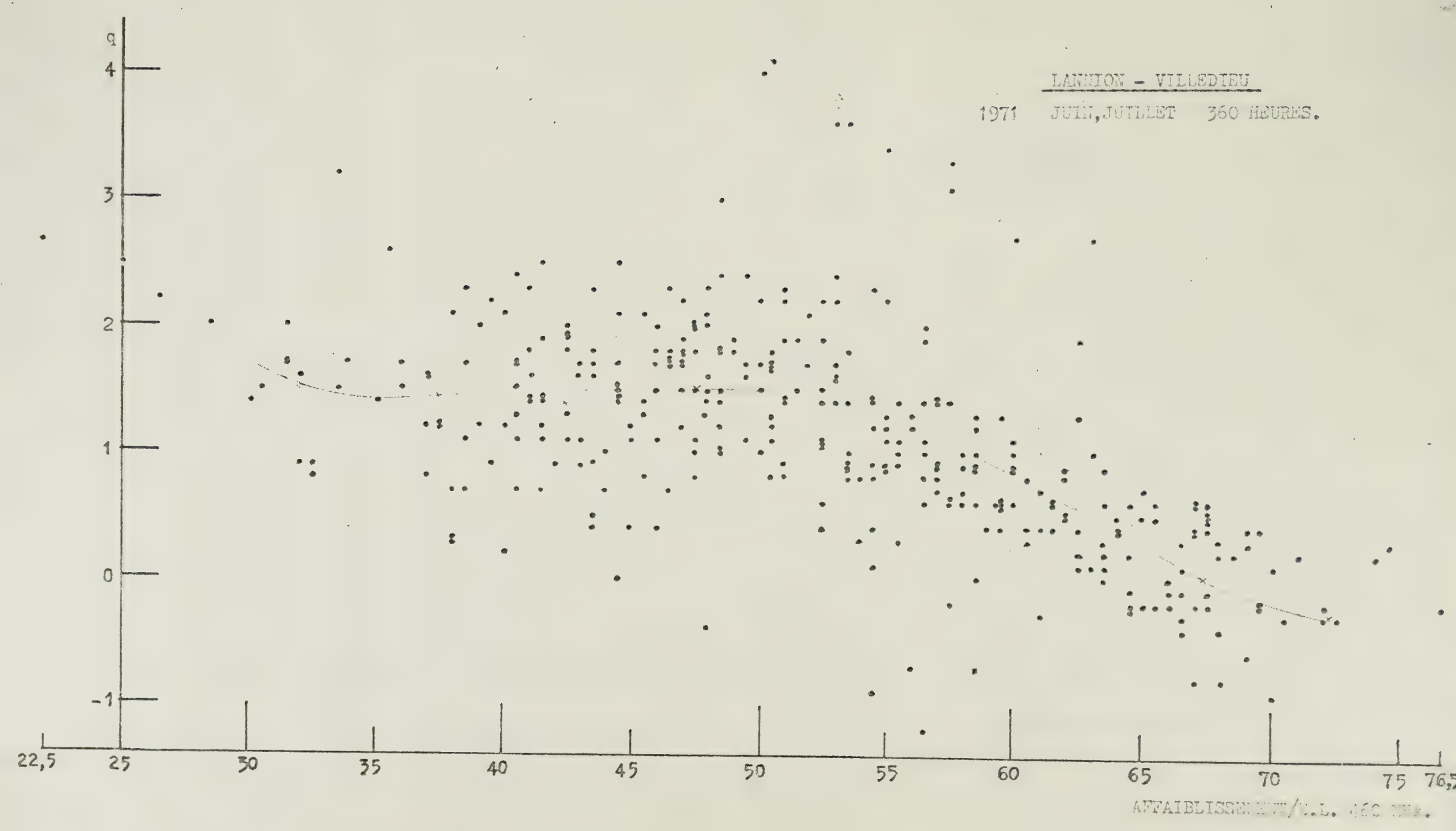

LANNION - VILLEDIEU
1971 JUIN, JUILLET 360 HEURES.
q
4
3
2
1
0
-1
22,5
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
76,5

FIG.21

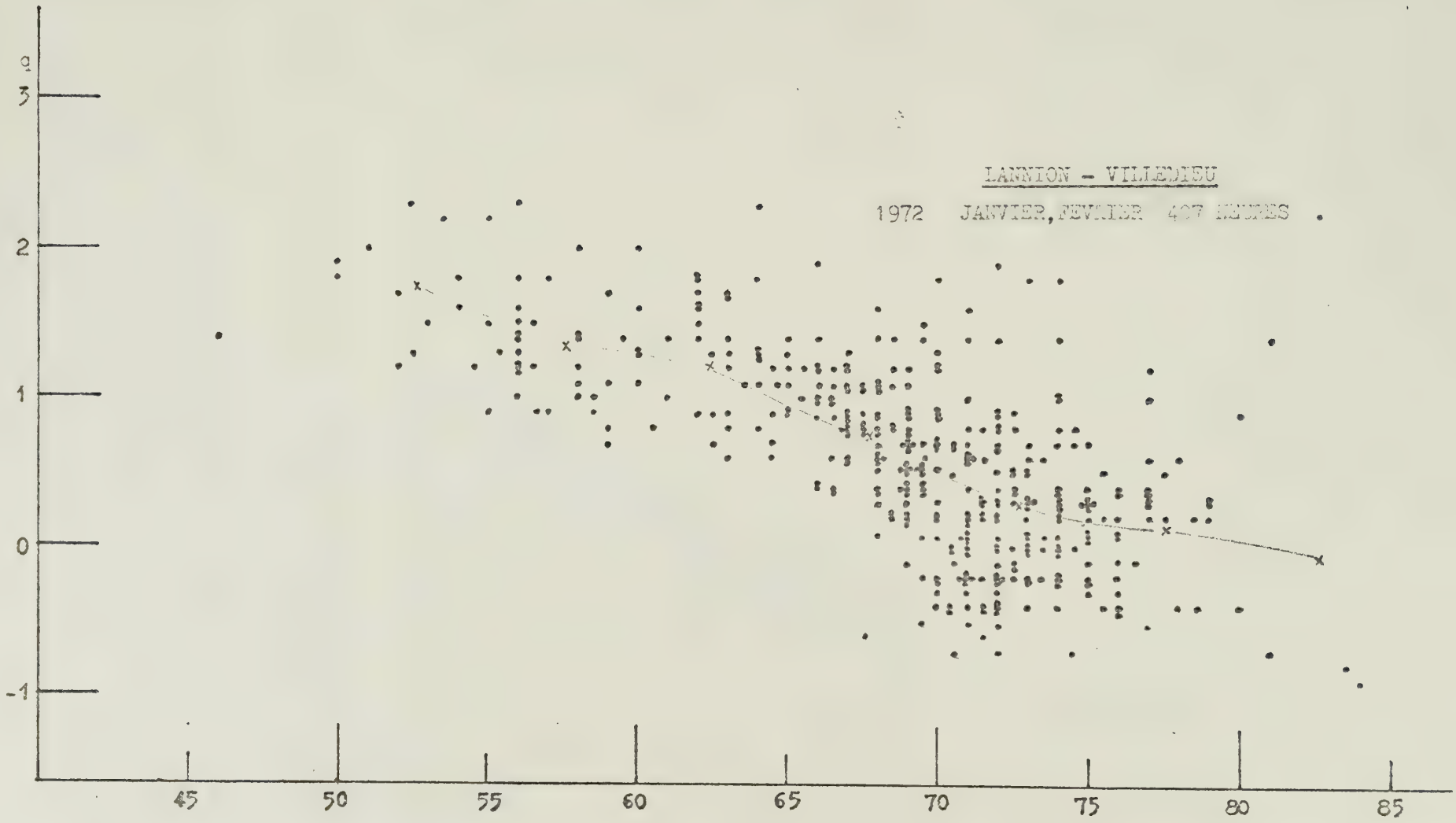

LANNION - VILLEDIEU
1972 JANVIER, FEVRIER 407 HEURES
3
2
1
0
-1
45
50
55
60
65
70
75
80
85
AFFAIBLISSEMENT/E.L. 460 MH.

FIG.22

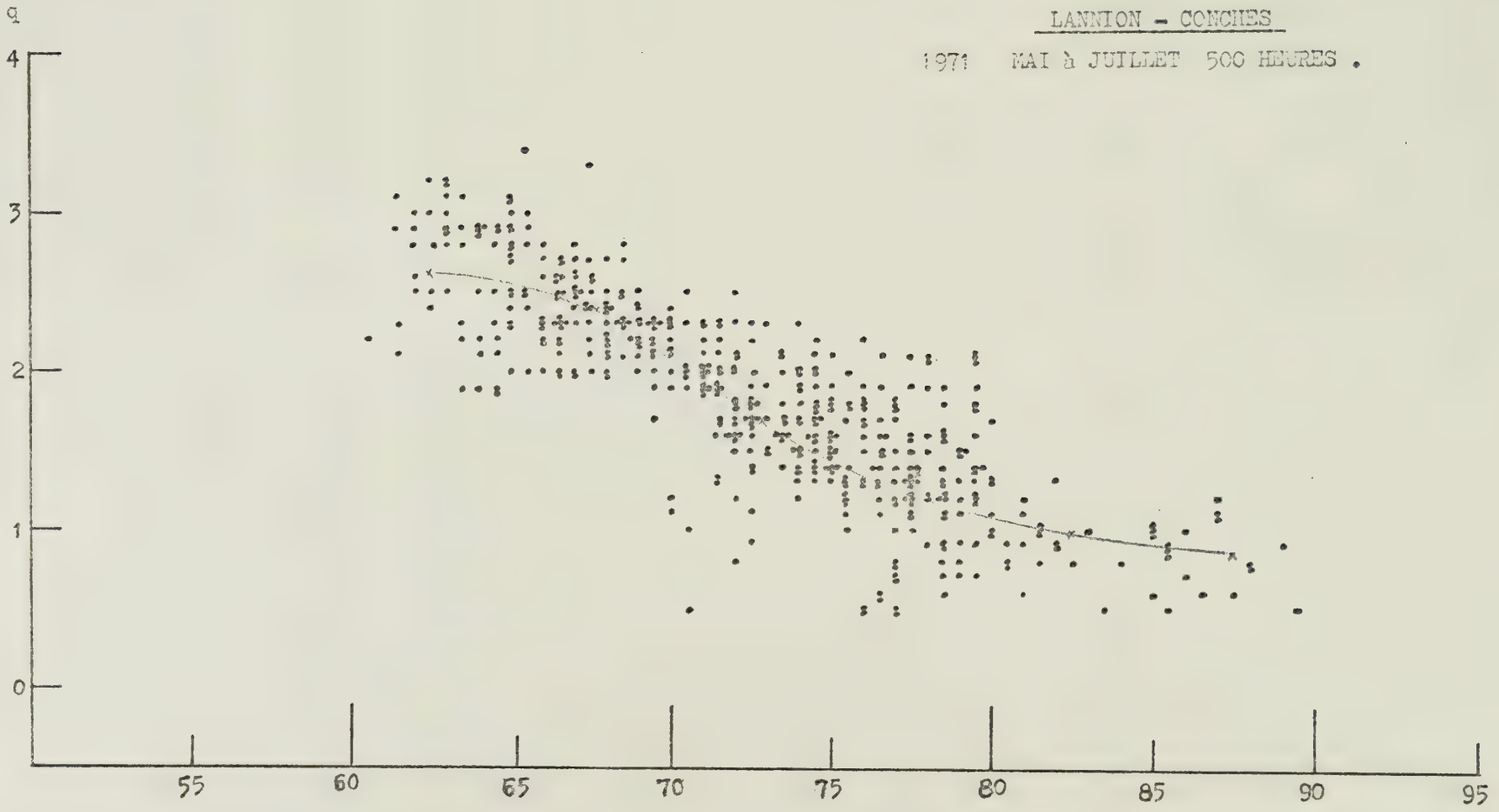

q
LANNION - CONCHES
1971 MAI à JUILLET 500 HEURES .
4
3
2
1
0
55
60
65
70
75
80
85
90
95
AFFAIBLISSEMENT/E.L. 460 MHz.

FIG.23

LANNION - CONCHES

1972 MARS 301 HEURES.

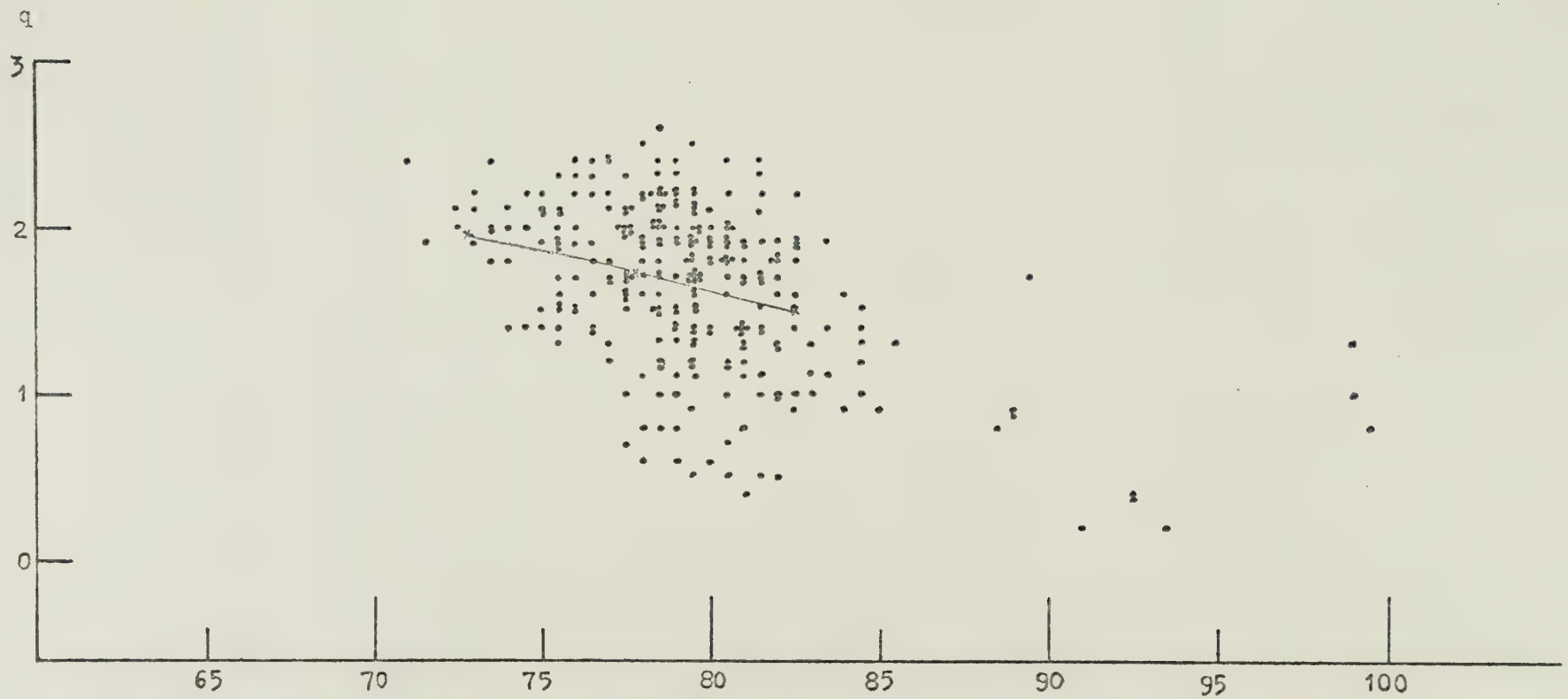


FIG.24

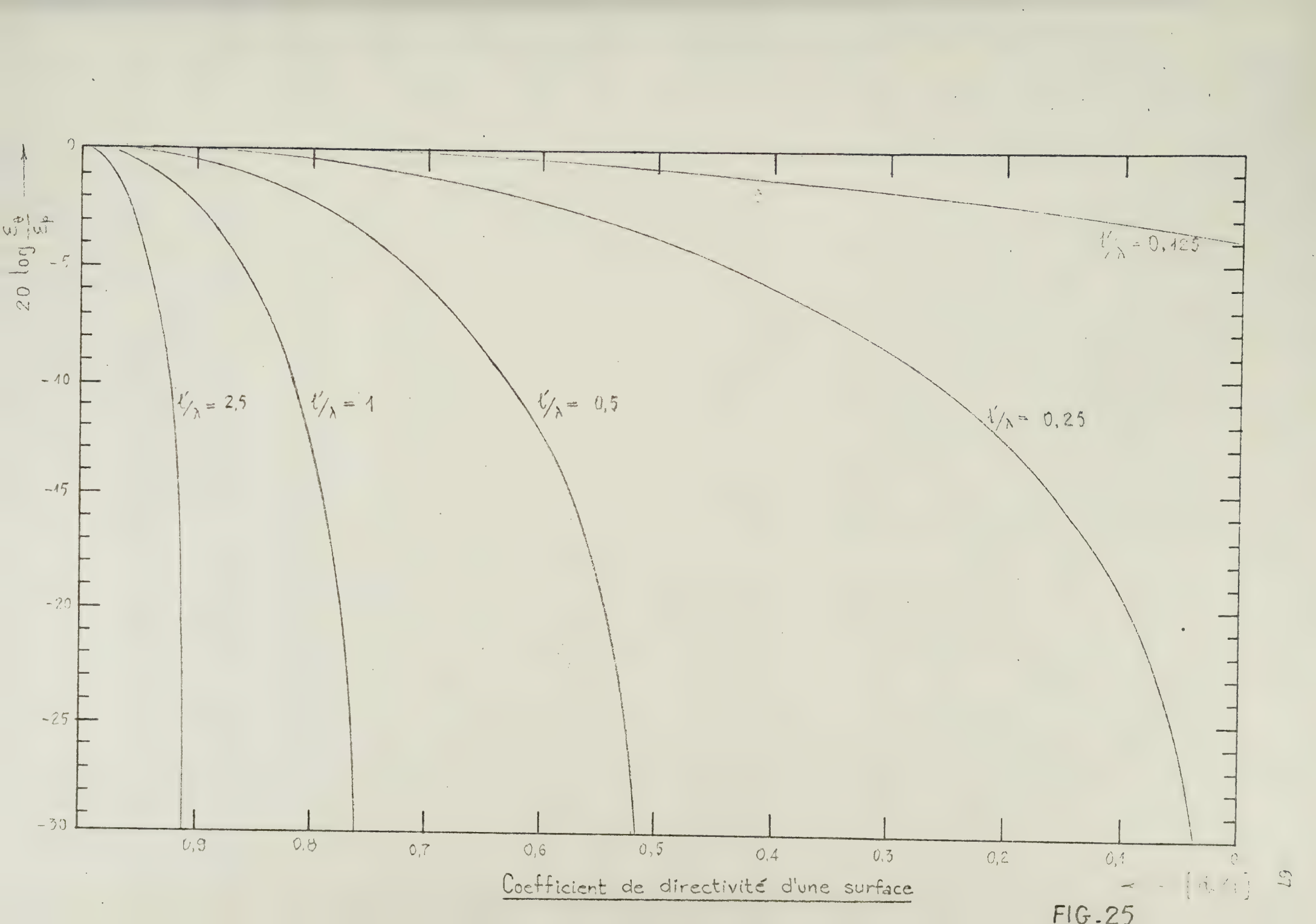
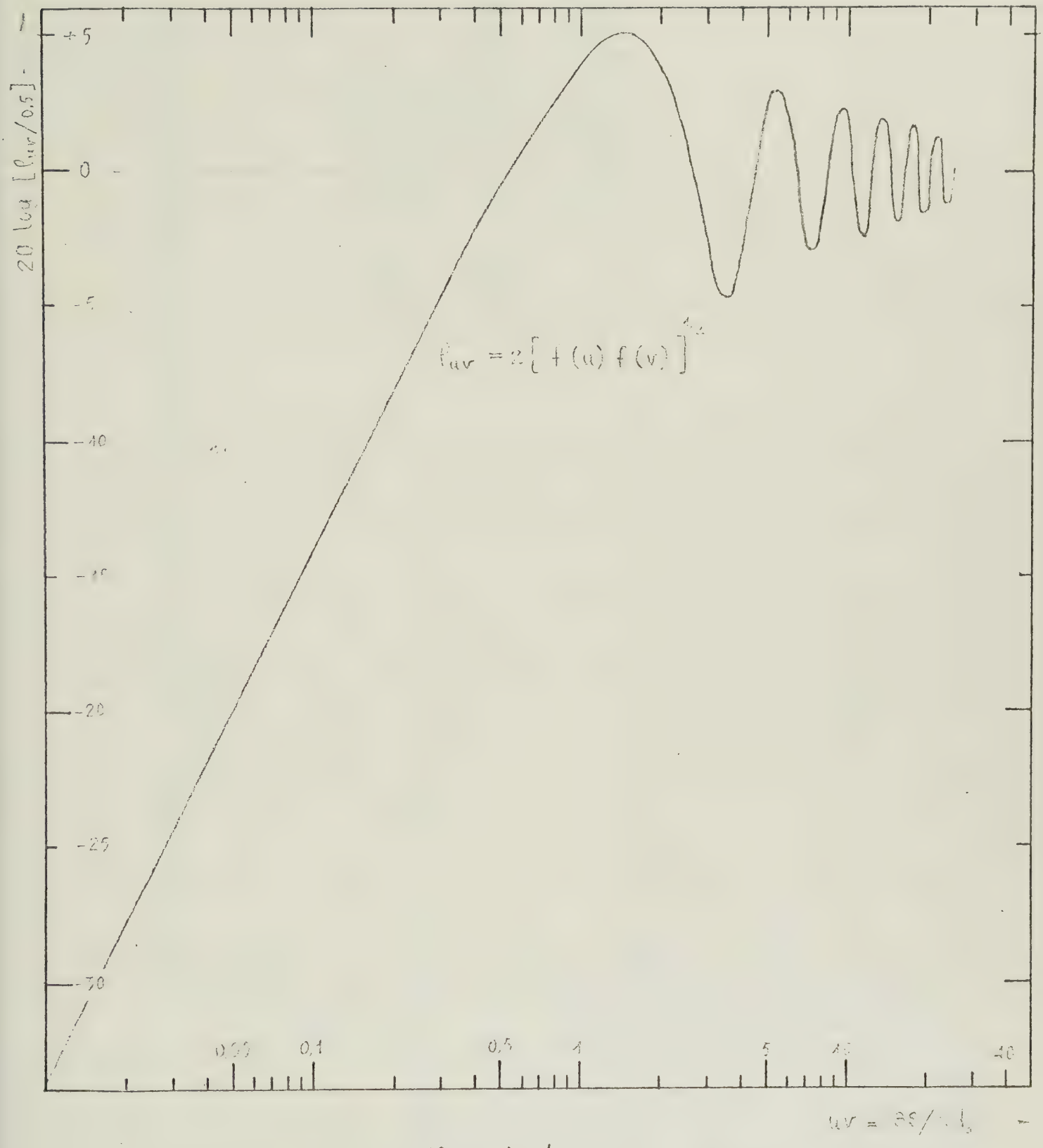

0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
20 log Se/Sp
l'/λ = 0,125
l'/λ = 0,25
l'/λ = 0,5
l'/λ = 1
l'/λ = 2,5
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Coefficient de directivité d'une surface

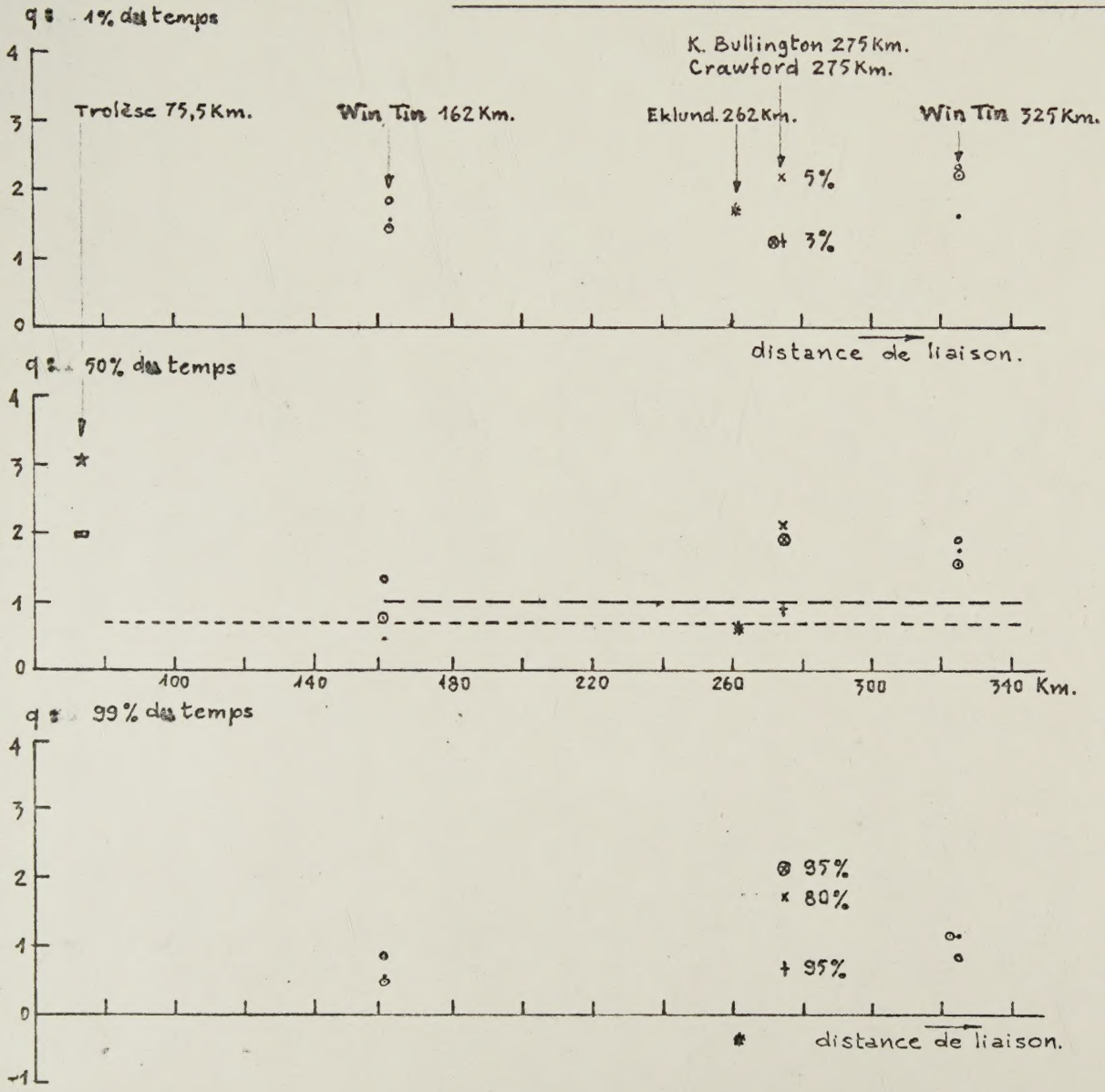
FIG.25



Coefficient d'HYGENS - FRESNEL

FIG-26

RESULTATS EXPERIMENTAUX DE L'INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA PROPAGATION TROPOSPHERIQUE



-----	K. Bullington	(300 - 3000) MHz	résultats collectifs vers 1950.
.....	K. Bullington	(100 - 1000) MHz	
▭	Trolèse	(3230 - 9380) MHz	vers 1954
★	Trolèse	(1250 - 3230) MHz	
×	K. Bullington	(505 - 4090) MHz (juin)	1953-54
⊗	K. Bullington	(505 - 4090) MHz (année)	
+	Crawford	(460 - 4110) MHz	1956-57
✱	Eklund	(1000 - 3000) MHz	1968
○	Win Tin	(460 - 2220) MHz (mai-juil)	1971
.	Win Tin	(460 - 2220) MHz (jan-mars)	1972
⊙	Win Tin	(460 - 2220) MHz (année)	1971-72

FIG-27